

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Sledování vlivu vibrací na obráběcí proces

Monitoring the Impact of Vibrations on the Machining Process

Student:

Vojtěch Schreier

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Schreier**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Sledování vlivu vibrací na obráběcí proces**  
**Monitoring the Impact of Vibrations on the Machining Process**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Zpracování naměřených hodnot.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
- [3] VLACH, B. a kol. *Technologie obrábění a montáží*. Praha : SNTL, 1990. ISBN 80-03-00143-09.
- [4] POPEOVÁ, V. *Monitorovanie opotrebenia rezných nástrojov*. Žilina : Vydavateľstvo ŽU EDIS Žilina, 2001. ISBN 80-7100-700-5.
- [5] ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha : Český normalizační institut, 1996. 32 s.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



  
Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Ostravě 19. 5. 2013




podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), že ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výdělek její obhajoby.

V Ostravě: 19. 5. 2013

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Vojtěch Schreier

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Holasovice 26  
747 74 Neplachovice

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

SCHREIER, V. *Sledování vlivu vibrací na obráběcí proces: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní, katedra obrábění a montáže, 2013, 60 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Tématem bakalářské práce je sledování vlivu vibrací na obráběcí proces. Vibrace vznikající při obráběcím procesu zásadním způsobem ovlivňují rozměrovou přesnost obráběné součásti a také drsnost jejího povrchu. Cílem bakalářské práce je zjistit, v jaké míře vibrace ovlivňují proces obrábění a jaký je případný negativní dopad vibrací na obráběcí stroj. Součástí práce je také popis zařízení pro záznam vibrací, umístění snímačů na stroji a teoretický rozbor vibrodiagnostiky. Práce obsahuje zpracované naměřené hodnoty. Cílem práce je také možnost případného využití sledovacího zařízení, které by mohlo být součástí obráběcího stroje v praxi.

## **ANOTATION OF BACHELOR THESIS**


SCHREIER, V. *Monitoring the Impact of Vibrations on the Machining Process: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2013, 60 p. Thesis head: KRATOCHVÍL, J.

Theme of this bachelor thesis is monitoring the impact of vibrations on the machining process. Vibration during machining process significantly affect the dimensional accuracy of machined parts and roughness of the surface. The aim of this work is to determine the extent to which vibration affects the machining process. Any negative impact vibration on the machine tool. The work is a description of the equipment for recording vibration sensor location on the machine and the or etical analysis Vibrodiagnostics. The work contains processed measured values. The aim is also able to use any monitoring equipment that could be part of a machine tool into practice.

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D., za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Blatovi, Ph.D. za cenné rady a odborné konzultace v problematice vibrodiagnostiky. Poděkování patří také mým spolužákům Martinu Bilíkovi, Václavu Královi a Adamu Pomykaczovi, kteří se podíleli na experimentu. Také bych chtěl poděkovat VŠB – TU Ostrava za možnost provedení experimentu.

V Ostravě: 19. 5. 2013

  
.....  
podpis

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů.....                   | 9  |
| 0 Úvod.....  | 10 |
| 1 Teoretický rozbor experimentu.....                     | 11 |
| 1.1 Vývoj měření .....                                   | 11 |
| 1.2 Základní terminologie.....                           | 11 |
| 1.3 Diagnóza poruchy .....                               | 11 |
| 1.4 Detekce poruchy .....                                | 12 |
| 1.4.1 Systém údržby.....                                 | 12 |
| 1.5 Nejběžnější negativní projevy vibrací .....          | 13 |
| 1.6 Výskyt poruch během technického života výrobku.....  | 13 |
| 1.7 Harmonické kmitání, základní vztahy .....            | 15 |
| 1.8 Rychlá Fourierova transformace (FFT) .....           | 17 |
| 1.8.1 Algoritmus FFT a jeho vlastnosti .....             | 17 |
| 1.9 Akcelerometry .....                                  | 18 |
| 1.9.1 Snímače s piezo technologií .....                  | 19 |
| 1.9.2 Akcelerometry se seismickou hmotou.....            | 20 |
| 1.9.3 Umísťování snímačů, provozní pokyny.....           | 22 |
| 1.10 Použité měřidlo ADASH A4400 – VA4 Pro .....         | 24 |
| 1.10.1 Měřidlo – technická specifikace dle výrobce ..... | 25 |
| 1.10.2 Použité snímače vibrací, stručný popis.....       | 26 |
| 1.11 Použitý stroj .....                                 | 27 |
| 1.12 Použitý nástroj .....                               | 28 |
| 1.12.1 Držák destičky .....                              | 29 |
| 1.13 Ostatní použité vybavení .....                      | 30 |
| 1.13.1 Dílenský mikroskop s periferiemi.....             | 30 |
| 1.13.2 Drsnoměr Mitutoyo Surftest řady SJ .....          | 31 |
| 1.14 Obráběná ocel – příprava polotovaru.....            | 32 |

|   |    |
|---|----|
| 2. Provedení experimentu .....                                      | 33 |
| 2.1 Cíle experimentu.....   | 33 |
| 2.2 Postup experimentu.....   | 33 |
| 2.3 První část experimentu.....                                     | 33 |
| 2.3.1 Vyhodnocení hodnot naměřených přístrojem A4400 - VA4Pro ..... | 35 |
| 2.4 Druhá část experimentu .....                                    | 41 |
| 2.4.1 Vyhodnocení hodnot naměřených přístrojem A4400 - VA4Pro ..... | 44 |
| 3. Závěr .....  | 56 |
| 4. Seznam použité literatury .....                                  | 58 |
| 5. Seznam příloh .....  | 60 |



## Seznam použitých zkratk a symbolů

| Značka         | Popis  | Jednotka               |
|----------------|--|------------------------|
| A              | Tažnost  | [%]                    |
| a              | Zrychlení  | [m.s <sup>-1</sup> ]   |
| a <sub>p</sub> | Hloubka řezu   | [mm]                   |
| c              | Citlivost  | [dB]                   |
| CA             | Oxidická keramika na bázi Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | [-]                    |
| CC             | Povlakovaná keramika                                     | [-]                    |
| D              | Průměr po odebrání třísky                                | [mm]                   |
| ε <sub>0</sub> | Permitivita vakua  | [F.m <sup>-1</sup> ]   |
| f              | Frekvence  | [Hz]                   |
| f <sub>p</sub> | Posuv  | [mm]                   |
| FFT            | Rychlá Fourierova transformace                           | [-]                    |
| g              | Zrychlení  | [m.s <sup>-2</sup> ]   |
| L              | Obrobená délka   | [mm]                   |
| m              | Hmotnost   | [kg]                   |
| MEMS           | Mikroelektromechanický systém                            | [-]                    |
| n              | Otáčky   | [min <sup>-1</sup> ]   |
| P <sub>p</sub> | Příkon   | [W]                    |
| Ra             | Drsnost povrchu, střední aritmetická úchylka             | [μm]                   |
| RMS            | Root Mean Square (efektivní hodnota)                     | [-]                    |
| Rz             | Drsnost povrchu, největší výška nerovnosti               | [μm]                   |
| S              | Plocha   | [m <sup>2</sup> ]      |
| t              | Doba záběru nástroje                                     | [min]                  |
| U              | Napětí   | [V]                    |
| VB             | Opotřeбенí hřbetu nástroje                               | [mm]                   |
| VBmax          | Opotřeбенí hřbetu nástroje maximální                     | [mm]                   |
| v <sub>c</sub> | Řezná rychlost   | [m.min <sup>-1</sup> ] |

## 0 Úvod

Vývoj nových technologií je stále na vzestupu a v dnešní době již existuje moderní, přesná a kvalitní měřicí technika, díky níž jsme schopni odhalovat příčiny nežádoucích vlivů vznikajících při obráběcím procesu. Máme k dispozici zařízení, díky kterému jsme schopni sledovat chování obráběcího stroje a nástroje v soustavě stroj, nástroj, obrobek a přípravek, a následně vyvodit patřičný závěr.

Problémem bývá náročnost s realizací samotného experimentu, a to především finanční. Katedra obrábění a montáže, Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava nevlastní takové zařízení, kterým by bylo možno sledovat a zaznamenávat hodnoty vibrací vznikající při procesu obrábění. Proto byla oslovena katedra výrobních strojů a konstruování – útvar 340, která je vlastníkem speciálního špičkového měřidla pro provádění měření v oblasti vibrodiagnostiky strojů a zařízení, přístroj AdashA4400 - VA4 Pro. S pomocí katedry 340 bylo možno realizovat model monitorovacího zařízení, který byl aplikován na klasickém hrotovém soustruhu v laboratořích katedry 346, na němž byl proveden samotný experiment.

V této bakalářské práci je popsán postup měření vibrací. Práce pojednává o teorii z oblasti vibrodiagnostiky, o popisu sledovacího zařízení a jeho periferiích, o použitém stroji, o obráběném materiálu a použitých řezných materiálech. Praktická část se zabývá vyhodnocením naměřených hodnot, jejich porovnáním s kvalitou obrobeného povrchu a s velikostí opotřebení řezného materiálu.

Podklady k teoretické části této práce byly získány z odborné literatury a z informací nabytých z dosavadního studia.

# **1 Teoretický rozbor experimentu**

V 1. kapitole je popsán teoretický rozbor problematiky.

## **1.1 Vývoj měření**

Vývoj vibrodiagnostiky v podstatě kopíruje vývoj metod technické diagnostiky. Od pocitových a vizuálních vjemů, přes jednoduché snahy o zesílení vibračního, resp. hlukového signálu, se dostáváme až k použití nejmodernější měřicí techniky s maximalizací vypovídajících schopností o technickém stavu sledovaného objektu.

Za přelom je nutno považovat nasazení výpočetní techniky pro měřicí techniku, které přineslo převratné změny do údržby a vibrodiagnostiky. Umožnilo nejen měření vibračního signálu, ale především možnost jeho vyhodnocení v reálném čase, a z toho plynoucí obrovský přínos po technické a hlavně finanční stránce. [1]

## **1.2 Základní terminologie**

Základním cílem sledování vibrací rotujících strojů je poskytnutí informací o provozním a technickém stavu za účelem zajištění údržby. Nedílnou součástí uvedeného procesu se tak stává i hodnocení stavu a průběhu vibrací za dobu dosavadního provozu.

Je nutno si uvědomit, že vibrace u rotujících strojů jsou úzce vázány na dynamické namáhání stroje, souvisí se stavem ložisek, převodovek, nevývahou, nesouosostí, trhlinami v důležitých komponentech, opotřebením apod., takže jejich monitorování a vyhodnocení patří k základním a rozhodujícím metodám technické diagnostiky. [1]

## **1.3 Diagnóza poruchy**

Je to analýza okamžitého stavu sledovaného objektu, především pak jeho provozuschopnost za určitých provozních podmínek. Hlavními úkoly diagnózy poruch jsou:

- **Detekce** – odhalení existence vznikající poruchy
- **Lokalizace** – určení oblasti, v níž se porucha vyskytuje
- **Specifikace** – stanovení příčiny vznikající poruchy vyhodnocením diagnostického signálu
- **Predikace** – stanovení prognózy zbytkového času do opravy součástí za účelem plánování údržby zařízení

Tyto čtyři základní fáze detekce vibrací rozhodují o postupu a plánování údržby. Lokalizace poruchy je zbytečná v případě, že se monitoruje pouze jedna část zařízení. Uvedené čtyři fáze lze univerzálně použít pro detekci vzniklé poruchy. [1]

## 1.4 Detekce poruchy

Technický vývoj a schopnost udržet si na trhu svou pozici si žádá zlepšení a zpřesnění výrobních postupů. Proto jsou kladeny i větší nároky na údržbu a její metody, ale také na použitou strategii při plánování výměny vadných součástí. Údržbu musíme chápat jako nedílnou součást výrobního procesu. Provozní spolehlivost je určena především bezporuchovostí, kterou zajistíme právě správnou a pečlivou údržbou strojního zařízení. [1], [2]

### 1.4.1 Systém údržby

Pravidelné a pečlivé sledování technického stavu strojního zařízení má příznivý vliv na jeho provozuschopnost. Provozní zkušenosti a odborná literatura uvádí, že nasazení správného systému údržby se projeví na celkové úspoře. Hlavně technické, technologické a ekonomické.

- **Výhody nasazení systému údržby:**
  1. technická a technologická úspora
  2. snížení neplánovaných výpadků výroby a tím pádem snížení počtu neplánovaných oprav

3. snížení spotřeby náhradních dílů
4. zvýšení bezpečnosti práce obsluhy
5. navýšení kvality výroby a výrobní kapacity
6. zvýšení životnosti stojů a nástrojů
7. ekonomická úspora (snížení nákladů na údržbu až o 30%, zvýšení produkce v důsledku nízkých odstávek porouchaných strojů)

▪ **Nevýhody nasazení systému údržby:**

1. první přínos se projeví až za dlouhou dobu (10 – 12 měsíců)
2. nutná počáteční investice do nové technologie [1], [2]

## **1.5 Nejběžnější negativní projevy vibrací**

Vibrace se samozřejmě negativně projevují na celkovém stavu strojního systému. Jejich působením se několikanásobně zvyšuje riziko poškození důležitých částí stroje, a s tím úzce související neplánované odstávky strojů a prostoje zaměstnanců.

**Negativní projevy vibrací tedy jsou:**

- nadměrné opotřebení hlavních částí a to především ložisek a uložení rotačních částí strojů,
- zvýšení hlučnosti celého systému,
- zhoršení schopnosti dodržení předepsaných tolerancí při obrábění,
- nucené prostoje při neplánované odstávce a z toho plynoucí i vyšší ekonomické zatížení. [1], [2]

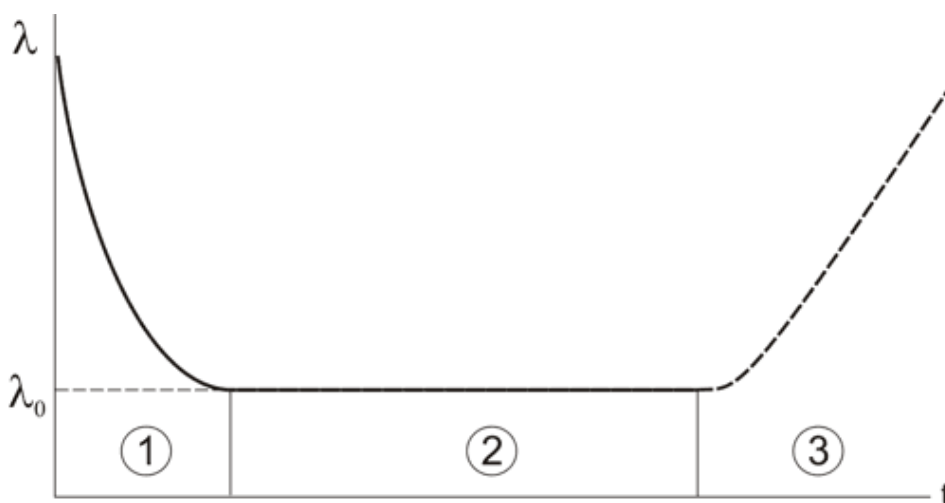
## **1.6 Výskyt poruch během technického života výrobku**

Vznik poruchy výrobku během jeho technického života lze považovat za náhodný jev. Spolehlivostí součástky se rozumí schopnost zachovávat požadované vlastnosti v daných limitech za předem definovaných provozních podmínek během technického života součástky. Skutečná spolehlivost součástky závisí na konstrukčním řešení, mechanických a jiných vlastnostech materiálů, ze kterých je součástka vyrobena.

Také závisí na technologii výroby a podmínkách, ve kterých je provozována. V poslední řadě také na způsobu a době skladování a přepravy.

Spolehlivost součástky se udává číselnou hodnotou některého z normovaných ukazatelů spolehlivosti. Systémy určování ukazatelů spolehlivosti vychází z teorie počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky. Důležitou charakteristikou používanou k popisu spolehlivosti elektronických součástek je ukazatel intenzity poruch  $\lambda(t)$ . Například hodnota  $\lambda(t)=0,001h^{-1}$  udává, že během jedné hodiny provozu dojde k poruše prvku s pravděpodobností jedné tisícin.

Obecně se za typický průběh intenzity poruch v závislosti na čase života výrobku považuje tzv. vanová křivka viz Obr. 1. Z obrázku je patrné, že křivka je dělena na tři úseky:



**Obr. 1:** Vanová křivka se třemi oblastmi četnosti poruch

### **1 - DOBA ZÁBĚHU, ÚSEK ČASTÝCH PORUCH A VAD**

Zde v této oblasti dochází k výskytu častých poruch a vad v nedokonalostech materiálu či konstrukce apod.

### **2 - DOBA VLASTNÍHO PROVOZU, USTÁLENÉ PÁSMO PORUCH**

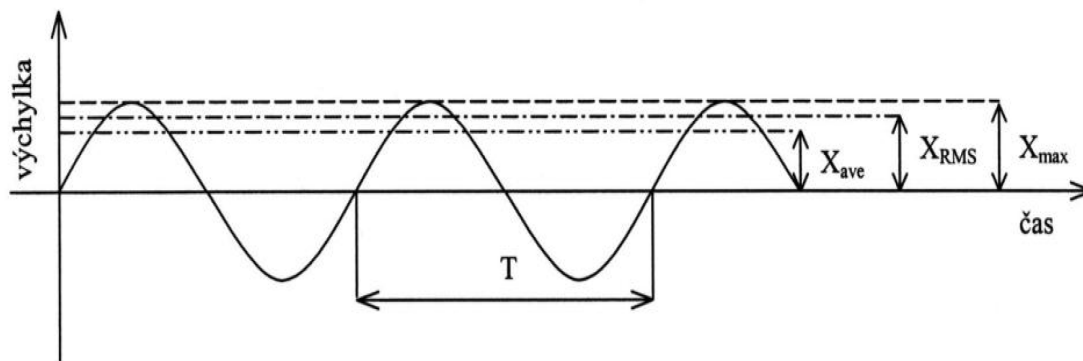
Zde se součástka dostává do stavu, kdy je výskyt možných poruch omezen na běžnou hladinu  $\lambda_0$ . Není však předem známa doba vlastního provozu.

### **3 - DOBA DOBĚHU, ÚSEK ÚNAVY ČI DOŽITÍ**

V této části charakteristiky se začínají projevovat vady, které vznikly opotřebením a výrobek je potřeba vyměnit, případně naplánovat další postup řešení. [3]

## 1.7 Harmonické kmitání, základní vztahy

U periodického kmitání se po stejné době, periodě, pravidelně opakuje stejný časový průběh. Nejjednodušším periodickým kmitáním je harmonické kmitání, obr 2.



**Obr. 2** Ukázka harmonického kmitání se zaznačením hlavní amplitudy, střední kvadratické a absolutní hodnoty

Frekvence kmitání se vypočítá ze vztahu:

$$f = \frac{1}{T} [\text{Hz}] \quad (1.1)$$

Pro posuvné kmitání je okamžitá výchylka:

$$x = X_{\max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = X_{\max} \cdot \sin(\omega t), \quad (1.2)$$

kde:

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad - \text{kruhová frekvence} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$X_{\max}$  - maximální výchylka, amplituda výchylky

Rychlost:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot X_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.3)$$

Zrychlení:

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot X_{\max} \cdot \sin(\omega t) = -A_{\max} \cdot \sin(\omega t) \\ &= A_{\max} \cdot \sin(\omega t + \pi) \end{aligned} \quad (1.4)$$

kde:  $A_{\max}$  - maximální zrychlení – amplituda zrychlení

$V_{\max}$  - maximální rychlost – amplituda rychlosti

$t$  - čas

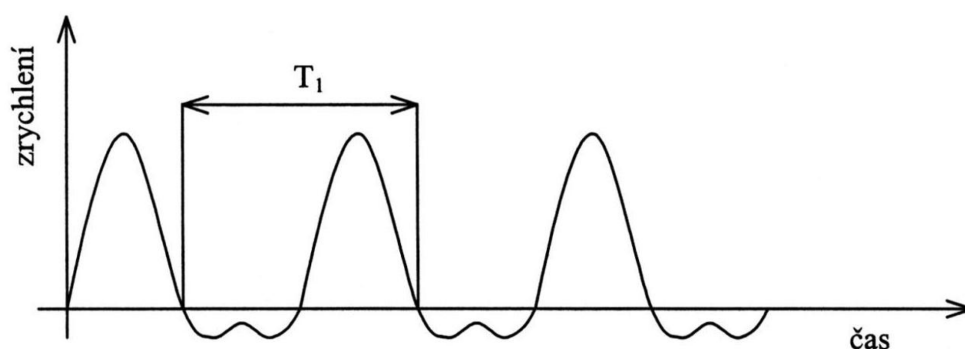
Dalšími veličinami jsou:

- Střední absolutní hodnota  $X_{ave}$
- Střední kvadratická hodnota  $X_{RMS}$ ,

$$\text{kde: } X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2 \cdot dt} \quad (1.5)$$

Střední kvadratická hodnota (RMS) se vyznačuje tím, že v sobě obsahuje informaci o výkonu kmitání.

Většina kmitání však zdaleka není čistě harmonickým pohybem. Příklad neharmonického periodického pohybu je uveden na obr. 3.



**Obr. 3:** Příklad neharmonického periodického pohybu

Určením výše uvedených hodnot a faktoru tvaru a faktoru vrcholu získáme informace, na jejichž základě můžeme určit, jestli se jedná o harmonický pohyb. Pro praktickou potřebu je nutno tyto informace doplnit.

Velmi účelnou metodou pro popis kmitání je **frekvenční analýza**. Tato metoda je založena na matematickém teorému formulovaném **Fourierem**: „Jakoukoliv periodickou funkci lze vyjádřit jako kombinaci harmonických funkcí a celistvými násobky základní frekvence.“

Jednotlivé harmonické složky spolu potom tvoří tzv. **frekvenční spektrum**.

#### **Harmonické kmitání rozlišujeme:**

- a) Stacionární náhodné kmitání
- b) Periodické kmitání
- c) Nestacionární náhodné kmitání [1]



## 1.8 Rychlá Fourierova transformace (FFT)

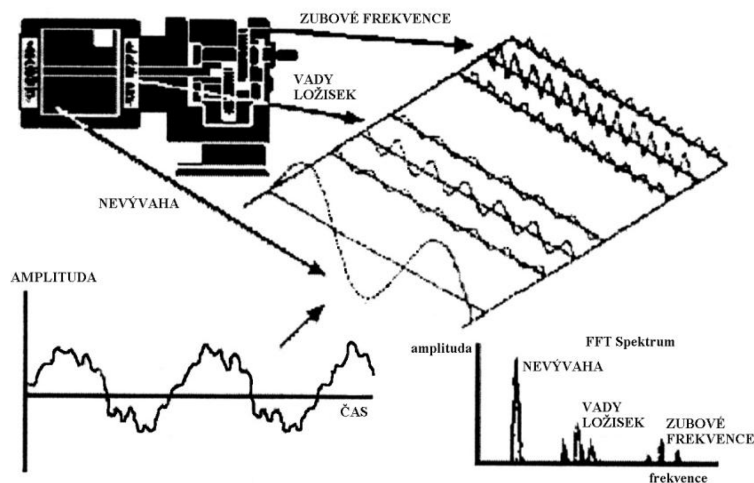
Pro diagnostikování technického stavu strojních zařízení můžeme použít hned několik různých metod. Každá metoda může přinést rozdílné výsledky.

A každá metoda se také hodí pro dané zařízení a daný pracovní režim. [1]

### 1.8.1 Algoritmus FFT a jeho vlastnosti

Průběh signálu se obvykle znázorňuje v časové oblasti. Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenějším způsobem pro technické účely je rozklad na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova řada. Pro obecné neperiodické funkce se používá rychlá Fourierova transformace – FFT (Fast Fourier Transformation).

Rozklad na Fourierovu řadu se týká hlavně periodických nebo kvasiperiodických signálů. Přestože počet složek rozkladu je obecně nekonečný, obsahuje tento rozklad jen složky s frekvencemi, které jsou násobky harmonické, základní frekvence opakování signálu (vyšší harmonické a subharmonické). Spektrum tak obsahuje jen izolované složky. Princip je patrný na obr. 4.



**Obr. 4:** Princip FFT

Podstatou FFT je volba zvláštní délky záznamu a vychází ze značného urychlení výpočtu (autoři Cooley a Tukey) Fourierovy transformace vycházející z Fourierovy řady. Vzhledem k rozsáhlosti dané problematiky jsou zde uvedeny jen základní informace. V nematematickém vyjádření je možno uvést, že FFT rozkládá signál na určité amplitudy odpovídající frekvenčním budícím složkám. [1]

## 1.9 Akcelerometry

Provoz všech strojů vázaný na rotující pohyb je provázen mechanickým kmitočtem – vibracemi. Vibracím se tedy v praxi nelze vyhnout. Vibrace jsou zapříčiněny **dynamickým namáháním stroje**, technickým stavem ložisek, hřídelí, převodovek, nevývahou rotujících částí, nesouosostí, **vůlemi pohybových součástí**, stykem třecích ploch, střetem dvou navzájem pohybujících se těles (rázy), aj.

Vibrodiagnostika využívá jako diagnostického parametru vibrace, a právě tento diagnostický parametr nám dává informace k objektivnímu zhodnocení technického stavu strojů. Včasné odhalení možné závady je pak základním předpokladem pro strategické plánování nápravných opatření.

Při měření vibrací by měl výstupní signál co nejvěrněji odpovídat průběhu mechanického kmitání, což není úkol lehký, a tomu také plně odpovídá možný rozsah předkládané kapitoly. Z těchto omezujících důvodů se pokusíme text poněkud komprimovat a cíleně zaměřit na bezpodmínečně nutné údaje.

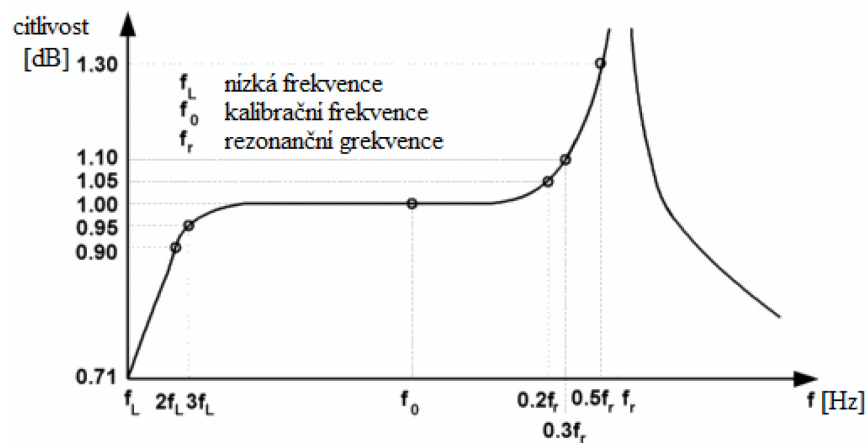
V podstatě existují dva základní typy snímačů pro monitorování vibračního stavu, jsou to:

- **seismická zařízení**, která se montují na konstrukci stroje a jejichž výstup je mírou absolutních vibrací konstrukce,
- **snímače relativní výchylky**, které měří vibrační výchylku a střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy. [1]

### **Rozdělení akcelerometrů (čidel vibrací) podle fyzikálního hlediska:**

- Piezo technologie  
piezoelektrické  
piezorezistivní
- odporové  
potenciometry  
tenzometry
- indukčnostní
- magnetoelastické
- kapacitní
- fotoelektrické
- ostatní (světlovodné, fluidikové a další)

Akcelerometry se vyrábí pro velký rozsah zrychlení od zlomků  $\text{m.s}^{-2}$  do  $10^6 \text{m.s}^{-2}$ . Frekvenční rozsah je od  $10^{-1}$  do  $10^5 \text{Hz}$ , dobře patrné z obrázku 5. [4]



**Obr. 5:** Frekvenční závislost akcelerometru na jeho citlivosti

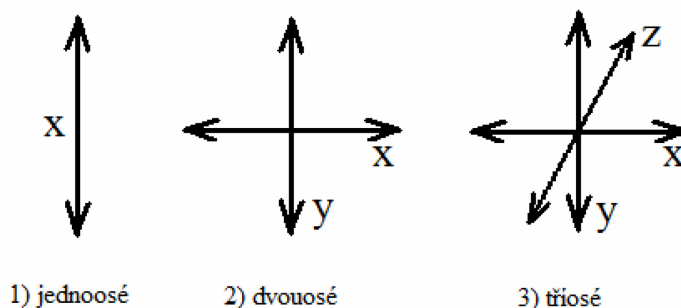
### 1.9.1 Snímače s piezo technologií

Tyto akcelerometry jsou dnes velice rozšířené a používají se v různých odvětvích nejenom průmyslu, ale i v přístrojích určených pro každodenní používání. V dnešní době je velkým hitem použití např. v mobilních telefonech. Primární veličinou, kterou akcelerometry snímají, je zrychlení, které převádějí na měřitelný elektrický signál.

Akcelerometry jsou schopny měřit dynamické (síly působící na snímač v pohybu) a gravitační zrychlení. Základní rozdělení akcelerometrů:

- Akcelerometry se seismickou hmotou využívají hmoty, která působí na piezosnímač, využívá se technologie MEMS (Mikro Elektro Mechanický Systém)
- Akcelerometry s proměnnou kapacitou využívají změny kapacity při zrychlení, využívají především technologie MEMS.

Druhé rozdělení akcelerometrů podle počtu citlivých os, viz obrázek 6:



**Obr. 6:** Rozdělení akcelerometrů podle počtu citlivých os

Všechny uvedené akcelerometry mohou měřit od velmi nízkých hodnot gravitačního zrychlení a díky robustním pouzdrům dokáží odolávat velkým rázům (ShockSurvival). Jejich napájecí napětí se pohybuje většinou od 3 do 24 V.

## **Rozdělení akcelometrů se seismickou hmotou:**

- **piezoelektrické** -využívají piezoelektrický krystal, který generuje náboj úměrný působící síle
- **piezorezistivní**- využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu.

### **1.9.2 Akcelerometry se seismickou hmotou**

#### **a) Piezoelektrické**

Piezoelektrické akcelerometry používají piezoelektrický materiál (krystal), který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání. Velikost působící síly je dána velikostí zrychlení a hmotností seismické hmoty podle Newtonova zákona. Vnitřní elektronika senzoru poté převádí náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí. Jednoduchá konstrukce umožňuje připojit akcelometr na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Tyto snímače nemohou být použity pro měření konstantního zrychlení, protože nedokáží měřit frekvence nižší než 0.1 Hz. Princip spočívá v tom, že jedna strana piezoelektrického krystalu je pevně připevněna k základně senzoru a k protilehlé straně krystalu je připevněna seismická hmota. Pokud je akcelometr vystaven zrychlení (vibračním, akceleraci, otřesům)  $a[s^{-2}]$ , potom působí seismická hmota na krystal silou  $F[m.s^{-2}]$ . Síla, která působí na krystal, způsobuje generování elektrického náboje na výstupu senzoru. Protože seismická hmota je konstantní, potom výstupní signál v podobě náboje je úměrný akceleraci senzoru. Pokud je akcelometr řádně upevněn k testovanému objektu, měří i jeho zrychlení. Akcelerometr charakterizuje nábojová citlivost a napěťová citlivost.

#### **b) Piezorezistivní**

Piezorezistivní akcelometr využívá piezorezistivní materiál namísto piezoelektrického a jeho prostřednictvím převádí sílu od seismické hmoty na změnu odporu. V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech se využívá sítě leptaných měřicích piezorezistivních snímačů zapojených do Wheatstoneova můstku. Piezorezistivní akcelerometry mají výhodu proti piezoelektrickým v tom, že mohou měřit i konstantní zrychlení, to znamená frekvenci změn od 0Hz. Je to dnes jeden z nejpoužívanějších principů využívaných v integrovaných akcelerometrech, především s technologií MEMS. Tento princip byl objeven v roce 1979 a je založen

na ohybu nosníku z piezorezistivního křemíkového materiálu vlivem působícího zrychlení. Ohybem se mění odpor, který je měřen a pomocí Wheatstoneova můstku je hodnota odporu převedena na změnu napětí.

### c) S proměnnou kapacitou

Tyto akcelerometry využívají změny kapacity mezi pohyblivou a pevnou částí snímače zrychlení. V dnešní době je hojně využíván princip v integrovaných akcelerometrech s technologií MEMS. Používají se především tam, kde nejsou příliš velké nároky na velikost zrychlení. Zrychlení, které působí na akcelerometr, vyvolá posunutí prostřední desky, a tím dojde ke změně obou kapacit v nepřímé úměře (čím větší bude kapacita prvního kondenzátoru, tím menší bude kapacita druhého kondenzátoru). Na výstupu se objeví obdélníkový signál o amplitudě úměrné hodnotě zrychlení.

- Výpočet kapacity deskového kondenzátoru:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} [\text{F}], \quad (1.6)$$

kde:  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$

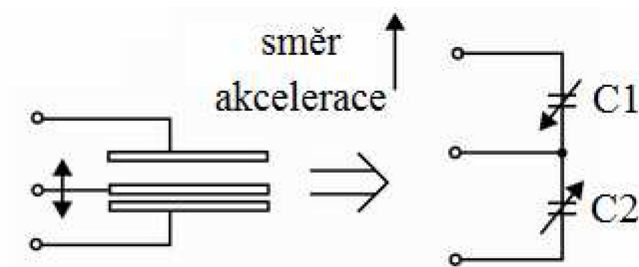
$\varepsilon_0$  - permitivita vakua =  $8,854187817 \cdot 10^{-12} [\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$

$\varepsilon_r$  - relativní permitivita, liší se druhem dielektrika

S - plocha desek kondenzátoru [ $\text{m}^2$ ]

d - vzdálenost desek kondenzátoru [m]

Na obrázku 7 je zakreslen základní princip fungování akcelerometru s proměnnou kapacitou. Podle směru působení zrychlení se kapacita jednoho kondenzátoru zvětšuje, druhého zmenšuje. Z tohoto se dá poznat jak velikost zrychlení, tak i směr jejího působení. [4]



**Obr. 7:** Princip funkce akcelerometru s proměnnou kapacitou

### 1.9.3 Umísťování snímačů, provozní pokyny

Vhodné měření vibrací je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu od místa vzniku vibrací až do snímače. Rozhodující je proto správný typ připevnění akcelerometru. Danou problematikou se podrobně zabývá norma ČSNISO 5348:99, která podrobně popisuje vliv způsobu uchycení akcelerometru k měřenému objektu.

**Tab. 1:** Vliv metody uchycení snímače vibrací na jeho výkonnost

| <b>Způsob upevnění snímače</b>   | <b>Vliv na výkonnost snímače (např. snímač s rezonancí 30 kHz)</b>                         |
|----------------------------------|--|
| Pevný šroubový spoj              | Žádné snížení rezonanční frekvence akcelerometru   |
| Izolovaný šroubový spoj          | S použitím vhodného materiálu je montážní rezonanční frekvence snížena na přibližně 28 kHz |
| Přilepení tuhým lepidlem         | Rezonance je snížena na asi 28 kHz   |
| Přilepení měkkým epoxidem        | Rezonance je snížena na asi 8 kHz  |
| Připevnění permanentním magnetem | Rezonance je snížena na asi 7kHz   |
| Ruční sonda se snímačem          | Rezonance je asi 2 kHz (nedoporučuje se pro měření nad 1 kHz)                              |

Z uvedené tabulky je patrné, že nejvhodnějším způsobem je uchycení akcelerometrů pomocí pevného šroubového spoje, protože nedochází k žádnému snížení rezonanční frekvence, a tudíž by měření bylo nejpřesnější. Tento způsob uchycení je vhodný z hlediska své tuhosti, nedojde zde k náhodnému pohybu jako třeba v případě permanentního magnetu. A v případě využití stálého měření, kdy snímače budou součástí stroje, je tento způsob nejvýhodnější.

Při umísťování snímačů je důležité dbát na vhodnou volbu měřicího místa, aby naměřené výsledky byly co nejpřesnější a aby co možná nejlépe vyjadřovaly skutečnou amplitudu vibrací, aby bylo možné co nejlépe vyhodnotit naměřené hodnoty.

Snímače se nesmí umístit na znečištěné, popř. lakované povrchy, a je přitom nutno myslet na co nejmenší vzdálenost snímače od místa vzniku vibrací. Umísťujeme a následně pak měříme v horizontálním, vertikálním a axiálním směru. V horizontálním směru měření obvykle vykazují největší hodnoty vibrací, to je

způsobeno konstrukčním provedením, jelikož stroj bývá většinou poddajnější v horizontálním směru (je tudíž dobrým ukazatelem nevyváženosti). Ve směru axiálním jsou naopak naměřené hodnoty vibrací nejmenší. V axiálním směru se projevují vibrace související s nesouosostí a ohnutým hřídelem.

Nedoporučuje se měřit na přechodech, plechových krytech, ale přímo na materiálu, který je přímo v kontaktu s ložiskem. Měření prováděná v pravidelných cyklech na stejných zařízeních se provádí vždy na stejných místech, aby bylo možné správně porovnávat a navazovat tak na předchozí prováděná měření.

Při umístění snímačů na měřené místo je nutno dodržovat bezpečnostní předpisy. Snímače se umísťují tak, aby byly v dostatečné vzdálenosti od rotujících součástí stroje. Taktéž je nutné umístit snímače na dobře přístupných místech. Při pokládání snímačů na stroj nesmí dojít k jejich poškození, tzn. neklepnout se snímačem, mohlo by dojít k jeho poškození. [1], [7]

### 1.10 Použité měřidlo ADASH A4400 – VA4 Pro

Přístroj A4400 - VA4 Pro je špičkovým přístrojem pro provádění měření v oblasti vibrační diagnostiky strojů. Poslední verze obsahuje rovněž modul pro provádění akustických měření. Přístroj obsahuje základní moduly analyzátoru, datakolektoru a rekordéru měřených signálů. Kromě toho je přístroj vybaven moduly pro provozní vyvažování strojů, měření rozběhů a doběhů, kontrolu mazání a poslech vibračního signálu. Přístroj je rovněž vybaven zcela unikátním expertním systémem, vyvinutým firmou Adash, pro automatickou detekci poruch strojů.



**Obr. 8:** Měřicí zařízení

Přístroj A4400 - VA4 Pro je dodáván s volitelným příslušenstvím, jako jsou snímače různých velikostí a provedení, kabely, magnety pro upevnění snímačů, otáčkové sondy, atd. Přístroj A4400 - VA4 Pro je určen zejména pro pracovníky zabývající se diagnostikou strojů, provozním vyvažováním, a rovněž pro servisní a inspekční činnost. Pro informaci, cena měřidla se pohybuje okolo půl milionu korun.  
[8]



### 1.10.1 Měřidlo – technická specifikace dle výrobce

**Tab. 2:** Technická specifikace

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Vstupní kanály:            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 AC s možností ICP napájení</li> <li>- 4 DC kanály pro procesní veličiny</li> <li>- 1 TACHO pro externí spouštění</li> </ul>   |
| Vstupní rozsahy:           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- AC +/- 12 V peak - peak</li> <li>- DC +/- 24 V</li> </ul>   |
| AD převodník:              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 24 bit, 64 bit zpracování signálu</li> </ul>  |
| Vzorkovací frekvence:      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- max. 196 kHz pro 1 kanál</li> <li>- max. 64 kHz současně pro 4 kanály</li> <li>- min. 64 Hz</li> </ul>  |
| Synchronizace              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- plně synchronní měření na 4 kanálech</li> </ul>   |
| Rozsah FFT:                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- min. 100 čar</li> <li>- max. 25 600 čar</li> </ul>  |
| Režimy měření:             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Datakolektor, pochůzková měření</li> <li>- Analyzátor – analytická měření</li> <li>- Balancer – provozní vyvažování strojů</li> <li>- RunUp – měření rozběhů a doběhů</li> <li>- Recorder – záznam signálů</li> </ul>           |
| Procesor:                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intel Atom 1,6 GHz</li> </ul>   |
| Paměť pro data:            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Až 120 GB</li> </ul>  |
| Zpracování dat:            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- FFT analýza v reálném čase</li> <li>- ENVELOPE – obálková analýza</li> <li>- ACMT – analýza stavu pomaloběžných ložisek</li> <li>- Řádová analýza</li> <li>- Měření v uživatelských pásmech</li> <li>- Měření otáček</li> </ul> |
| Displej:                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Barevný 800 x 600, LCD</li> </ul>   |
| Komunikační rozhraní:      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- USB, Ethernet</li> </ul>  |
| Teplotní rozsah, napájení: | <ul style="list-style-type: none"> <li>- -10 °C až +50°C, akumulátor pro 6 hodin provozu, AC 230 V</li> </ul>  |
| Rozměry a hmotnost:        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 230 x 140 x 60 mm, 2000 g</li> </ul>  |

### 1.10.2 Použité snímače vibrací, stručný popis

Snímače vibrací (akcelerometry) byly použity celkem tři, tzn. jeden pro směr horizontální, jeden pro směr vertikální, a konečně třetí pro směr axiální. Pro snímání ve směru horizontálním a radiálním byl použit akcelerometr typu AC 102 a v axiálním směru akcelerometr typu AC 104.

Jedná se o víceúčelové akcelerometry, jejichž tělo je vyrobeno z nerezové oceli a k měřenému místu se připojuje pomocí šroubu nebo silných permanentních magnetů. Magnety jsou připevněny ke snímačům, na jejich spodní část, pomocí šroubového spojení. Kabel sloužící ke spojení s přístrojem je vyveden v ose snímače v jeho horní části. Tyto snímače jsou vodotěsné a mohou tedy být použity i v kapalině.

Snímače jsou určeny zejména pro následující aplikace v celé řadě průmyslových odvětví:

- kompresory a čerpadla
- ventilátory a vzduchotechnika
- vřetena, dopravníky
- motory a převodovky
- různé stroje aj.

V následující tabulce jsou uvedeny pouze základní informace o použitých snímačích. Kompletní dokumentace je v příloze bakalářské práce, viz příloha č. 1 – Akcelerometr AC102 Series a příloha č. 2 – Akcelerometr AC104 SERIES.

**Tab. 3:** AC 102/4Series – základní technické údaje

|                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| citlivost          | 100 mV/g                 |
| provozní napětí    | 18 - 30 V DC             |
| pracovní frekvence | 0,5 - 15000 Hz           |
| pracovní teplota   | 50 - 121°C               |
| čidlo              | piezoelektrická keramika |
| hmotnost           | 90 g resp. 145 g         |



**Obr. 9:** Akcelerometr AC 102 Series



**Obr. 10:** Akcelerometr AC 104 Series

## 1.11 Použitý stroj

Celý experiment byl proveden na univerzálním hrotovém soustruhu bulharského výrobce MAŠSTROJ Trojan typ CV11MV, který vlastní katedra obrábění a montáže Vysoké školy báňské -Technické univerzity Ostrava. Soustruh se nachází v laboratoři VŠB – TUO.

Základní informace o použitém stroji jsou uvedeny v tabulce 4. Stroj je navíc vybaven frekvenčním měničem. A pro experiment byl vybaven ještě pyrometrem.



**Obr. 11:** Univerzální hrotový soustruh CV11MV

**Tab. 4:** CV11MV – technické parametry

| parametr                      | hodnota    |
|-------------------------------|------------|
| oběžný průměr nad ložem       | 500 mm     |
| oběžný průměr nad suportem    | 290 mm     |
| točná délka                   | 1100 mm    |
| průměr sklíčidla              | 250/315 mm |
| příkon hlavního elektromotoru | 15 kW      |

## 1.12 Použitý nástroj

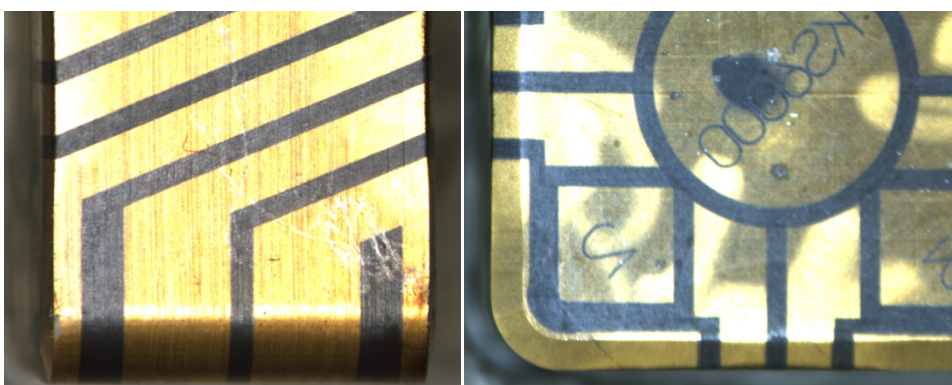
Během experimentu byly použity dva druhy řezných materiálů -vyměnitelné břitové destičky vyrobené z řezné keramiky upnuté do stejného držáku, viz kapitola 1.13 Držák destičky. Tyto druhy řezných materiálů byly vybrány také proto, že jsou vhodné ke sledování ostatních dějů při obráběcím procesu.

První destička DIAS SNGN 120712 T, viz obrázek 12, byla použita pro první část experimentu.



**Obr. 12:** Destička pro první část experimentu

Pro zbytek experimentu byla použita destička od firmy Kyocera - CERATIP KS6000. Tato destička je vyrobena z křemíkonitridové keramiky a na jejím povrchu je nanесena odporová vrstva (viz obr. 13)



**Obr. 13:** CERATIP KS6000 (hřbet a čelo)

Dle normy ISO 513 od výrobce je dáno, že skupina K se hodí pro obrábění materiálů s krátkou drobivou třískou, tedy především pro polohrubování až jemné dokončování litiny (temperované) a uhlíkových i legovaných ocelí. Tento materiál je vhodný také pro jemné soustružení tvrzených litin, případně kalených ocelí.

Destička KS6000 se zvýšenou tuhostí umožňuje obrábění s chlazením i bez. Je vhodná pro vysoké řezné rychlosti a posuvy. Nitridová keramika (na bázi  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) má velmi vysokou houževnatost a zachovává si také vysokou tvrdost a lomovou houževnatost a odolnost vůči teplotním rázům. S destičkou lze obrábět běžným i přerušovaným řezem.

| Workpiece Material | Cast Iron<br>(Gray Cast Iron/Ductile Cast Iron)   |        |     |          |
|--------------------|---|--------|-----|----------|
| Cutting Range      | Finishing   | ←————→ |     | Roughing |
| Classification     | K01   | K10    | K20 | K30      |
| Ceramic            | <div style="text-align: center;"> <div>A65</div> <div>A66N</div> <div style="border: 2px solid red; border-radius: 50%; padding: 5px; display: inline-block;">KS6000</div> </div> |        |     |          |

**Obr. 14:** Zařazení břitové destičky dle výrobce [9]



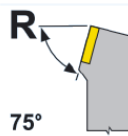

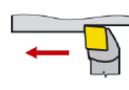





**Tab. 5:** Vlastnosti a oblast použití KS6000

| parametr                     | hodnota                       |
|------------------------------|-------------------------------|
| označení                     | KS6000                        |
| hlavní složka                | $\text{Si}_3\text{N}_4$       |
| tvrdost základního materiálu | 15,7 Gpa                      |
| lomová houževnatost          | 6,5 Mpa.m <sup>1/2</sup>      |
| příčné síly                  | 1230 Mpa                      |
| doporučená řezná rychlost    | 50 - 1500 m.min <sup>-1</sup> |

### 1.12.1 Držák destičky

Při experimentu byl použit speciální držák, umožňující vedení elektrického signálu svým tělem, značky CERADEX. Držák nese označení: XCSRNR2525M-1207SEN. Jeho rozměry a tvary jsou uvedeny v tabulce 6.

**Tab. 6:** Rozměry držáku CERADEX XCSRNR2525M-1207SEN [9]

| Druh držáku   | Způsob upnutí   | Tvar destičky   | Tvar nože  | Úhel hřbetu   |
|---|---|---|--|---|
| <b>X</b><br>Speciál<br>Speciál  | <b>C</b><br> | <b>S</b><br>  | <b>R</b><br><br>75° | <br><b>N</b><br>$\alpha_n = 0^\circ$ |
| Směr řezu   | Výška řezu  | Šířka držáku  | Délka držáku   | -   |
| <b>R</b><br> | <br>25       | <br>25        | <br><b>M</b> 150    | -   |
| Velikost hrany  | Tloušťka destičky   | Tvar destičky   | Úhel hřbetu  | provedení   |
| 12  | 7   | <b>S</b><br> | E  | <b>N</b><br>                       |

## 1.13 Ostatní použité vybavení

### 1.13.1 Dílenský mikroskop s periferiemi

Pro měření opotřebení destičky na jejím čele a hřbetu byl použit dílenský mikroskop od firmy INTRACO MICRO spol. s r.o. Z důvodu nedostatečného osvětlení byl použit osvětlovač od stejného výrobce, který je vybaven dvojicí ohebných světlovodů. Dále byl mikroskop vybaven digitální kamerou umožňující až pětinasobné zvětšení obrazu. O zaznamenání a převod snímků do počítače se postaral software MOTIC IMAGE PLUS 1.0 ML.

Ke správnému měření opotřebení pomocí mikroskopu musel být mikroskop zkalibrován pomocí kalibrační měrky. Postup byl následující: kalibrační měrka se vyfotila ve stejné vzdálenosti a zvětšení jako destička. Tímto byl mikroskop a zaznamenávací program připraven k použití.

Dílenský mikroskop v sestavě se stolním počítačem je vyobrazen na obrázku 15.





**Obr. 15:** Sestava dílenského mikroskopu a stolního počítače

### 1.13.2 Drsnoměr Mitutoyo Surftest řady SJ

Pro měření drsnosti povrchu po obrábění byl použit drsnoměr od firmy Mitutoyo. Jedná se o uživatelsky příjemný ruční měřicí přístroj, který je navržen pro použití ve výrobním prostředí. Je vybaven displejem a dvojicí tlačítek na horní straně. Základní technické informace jsou uvedeny v tabulce 7 a měřicí přístroj je vyobrazen na obrázku 16.



**Obr. 16:** Mitutoyo Surftest

**Tab. 7:** Technické údaje Mitutoyo Surftest

| parametr        | hodnota                |
|-----------------|------------------------|
| rychlost měření | 0,5 mm.s <sup>-1</sup> |
| snímací metoda  | indukční               |
| snímací dotek   | diamantový             |
| profil drsnosti | R (Ra, Rz, Ry)         |
| rozsah          | 0,01 - 100 μm          |

## 1.14 Obráběná ocel – příprava polotovaru

Pro experiment byla vybrána ocel 17 618 v podobě tyče kruhového průřezu. Oceli třídy 17 patří do skupiny legovaných ocelí. Třetí číslice v označení oceli vyjadřuje, jakým prvkem je ocel legována. V našem případě se jednalo o ocel legovanou manganem.

Polotovar měl jmenovitý průměr 74,5 mm a 550 mm délky. Polotovar byl připraven na pásové pile, kde proběhlo zkrácení na požadovanou délku. Následovalo orýsování středu a navrtání středícího důlku na sloupové vrtačce. Poté následovalo upnutí obrobku do univerzálního tříčelistového sklíčidla a podepření hrotem.

**Tab. 8:** Chemické složení použité oceli [10]

| Prvek     | Obsah v % |
|-----------|-----------|
| uhlík C   | 1,2       |
| mangan Mn | 12        |

**Tab. 9:** Tepelné zpracování [11]

| Tepelné zpracování  | Doporučená teplota [°C] |
|---------------------|-------------------------|
| kování              | 800 - 950               |
| rozpouštěcí žihání  | 1000 - 1050             |
| pozvolné ohřívání   | 850                     |
| dohřev              | 1000 - 1050             |
| ochlazování ve vodě | -                       |



**Obr. 17:** Upnutý polotovar



## **2. Provedení experimentu**

### **2.1 Cíle experimentu**

Během experimentu byla použita kvalitní sledovací a měřicí technika. Díky ní bylo možno pozorovat děje při obráběcím procesu a zaznamenávat měřené hodnoty v reálném čase. Cílem bylo zhodnotit případný negativní dopad vibrací na opotřebení řezného materiálu a na jakost obrobeného povrchu.

### **2.2 Postup experimentu**

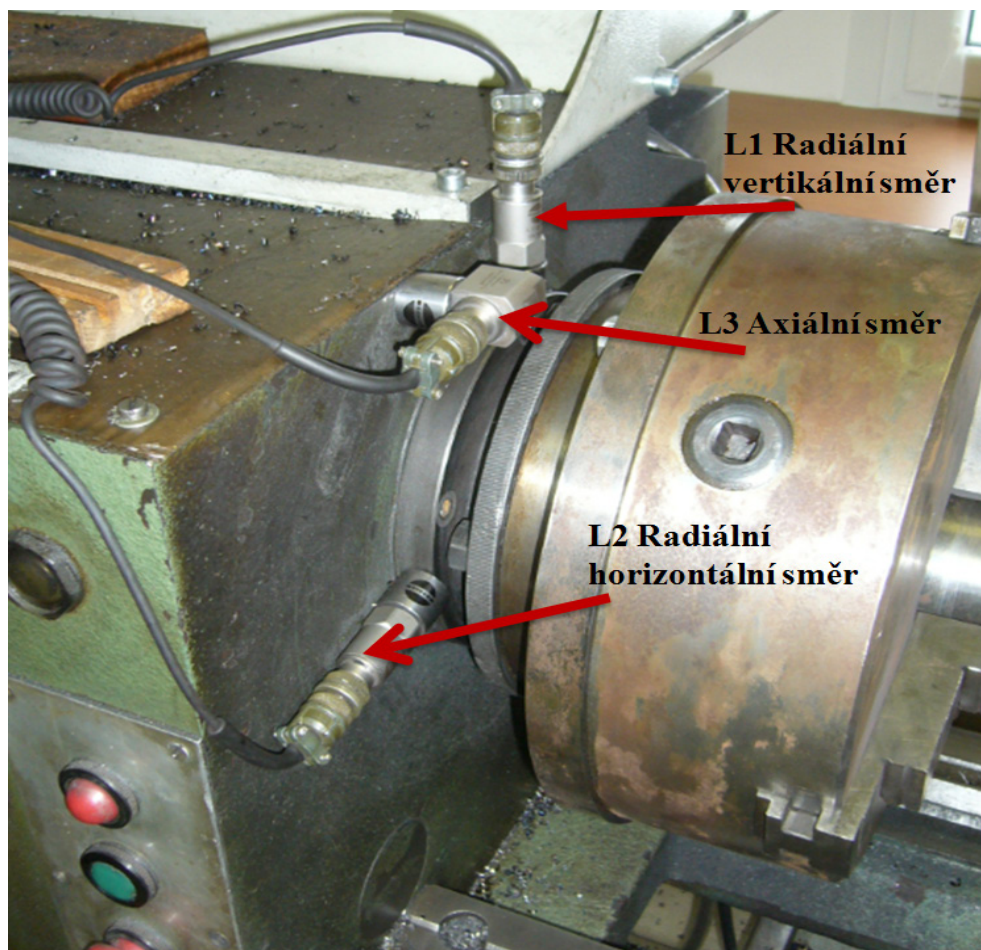
Před začátkem obrábění jsme připravili veškerou měřicí techniku, tj. dílenský mikroskop, stolní počítač, nainstalovali jsme pyrometr na nožový držák a nasměrovali jej do místa řezu. Vše bylo pečlivě seřizeno, nastaveno a připraveno k experimentu.

Samotný experiment je rozdělen na dvě části. První část zaznamenává vibrace vřetena soustruhu (snímače vibrací připojeny k vřeteníku) a je zde použita vyměnitelná břitová destička DIAS SNGN 120712 T, viz kapitola 1.12. Druhá část experimentu byla realizována se snímači vibrací připojených k nožovému držáku soustruhu a destičkou Kyocera KS6000.

### **2.3 První část experimentu**

V první části byly akcelerometry připevněny k vřeteníku stroje (patrně z obrázku 18). Veškeré potřebné parametry, tj. řezná rychlost, hloubka záběru, posuv, obráběná délka, jsou zaznamenány v tabulce 10 a 11. Při tomto měření byla měněna pouze řezná rychlost, a to: v první fázi se zvyšovala, a ve druhé fázi snižovala. Hodnoty zaznamenané přístrojem A4400 - VA4Pro jsou zpracovány a podrobněji popsány v kapitole 2.3.1.

V první fázi experimentu měl obráběný materiál ještě mírné povrchové nerovnosti, a tak mohlo být měření zatíženo chybou. Přesto byla dosažena relativně vysoká jakost obrobeného povrchu.



**Obr. 18:** Umístění snímačů na stroji – experiment 1

**Tab. 10:** Tabulka naměřených a vypočtených hodnot – experiment 1

|            | $a_p$ [mm]                   | $D$ [mm]                    | obráběná délka $L$ [mm] | $n$ [min <sup>-1</sup> ] |
|------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1. měření: | 1,5                          | 71,3                        | 13,4                    | 500                      |
| 2. měření: | 1,5                          | 71,3                        | 40                      | 800                      |
| 3. měření: | 1,5                          | 71,3                        | 120                     | 1250                     |
| 4. měření: | 1,5                          | 71,3                        | 137 (129 -<br>vylomení) | 1600                     |
|            | $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ] | $f$ [mm.min <sup>-1</sup> ] | $R_a$ [μm]              | $R_z$ [μm]               |
| 1. měření: | 112                          | 0,15                        | 2,2                     | 7,5                      |
| 2. měření: | 179                          | 0,15                        | 1,25                    | 3,9                      |
| 3. měření: | 280                          | 0,15                        | 2,28                    | 3,6                      |
| 4. měření: | 358                          | 0,15                        | 1,05                    | 5,3                      |

**Tab. 11:** Tabulka naměřených a vypočtených hodnot – experiment 1 – druhá část

|                   | $a_p$ [mm]                   | D [mm]                    | obráběná délka L [mm] | n [min <sup>-1</sup> ] |
|-------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>1. měření:</b> | 1,5                          | 71,3                      | 59                    | 1250                   |
| <b>2. měření:</b> | 1,5                          | 71,3                      | 47                    | 1000                   |
| <b>3. měření:</b> | 1,5                          | 71,3                      | 37                    | 800                    |
| <b>4. měření:</b> | 1,5                          | 71,3                      | 23                    | 500                    |
|                   | $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ] | f [mm.min <sup>-1</sup> ] | Ra [μm]               | Rz [μm]                |
| <b>1. měření:</b> | 280                          | 0,15                      | 2,11                  | 8,5                    |
| <b>2. měření:</b> | 224                          | 0,15                      | 1,18                  | 6,2                    |
| <b>3. měření:</b> | 179                          | 0,15                      | 1,48                  | 5,1                    |
| <b>4. měření:</b> | 112                          | 0,15                      | 1,22                  | 5,2                    |

### 2.3.1 Vyhodnocení hodnot naměřených přístrojem A4400 - VA4Pro

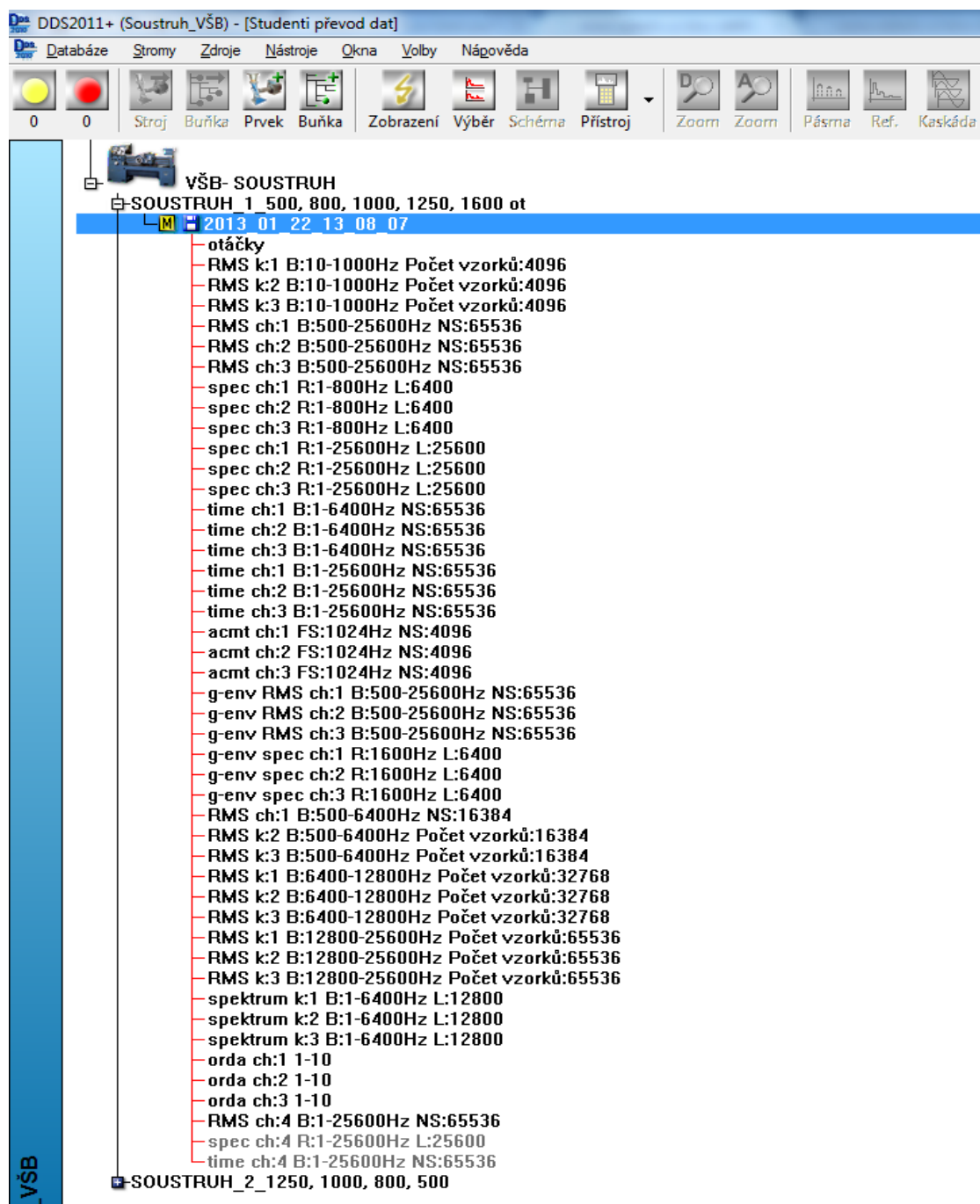
Záznam proběhl pomocí modulu „ROZBĚH“, který umožňuje stejná měření jako analyzátor, s tím rozdílem, že výsledky jsou ručně průběžně ukládány do paměti přístroje. Tento modul byl zvolen z důvodu změny řezných rychlostí (viz tabulka 10 a 11), kdy docházelo ke zvyšování resp. snižování otáček. Každé další měření tedy navazuje na měření předchozí.

První část experimentu, tzv. rozběh, je analyzována pomocí softwaru DDS 2011. Z měřicího přístroje, ve kterém bylo provedeno měření, byla tato data exportována do programu DDS 2011. Na obrázku 19 je znázorněno prostředí analyzačního programu.

Měřeny byly následující parametry a charakteristiky, vždy ve všech třech směrech:

- efektivní hodnoty rychlosti vibrací - v pásmu 10 – 1000 Hz
- časový záznam rychlosti vibrací - v pásmu 1 – 6400 Hz
- efektivní hodnoty zrychlení vibrací - v pásmu 500 – 25 600 Hz
- časový záznam zrychlení vibrací - v pásmu 1 – 25 600 Hz
- spektrum rychlosti vibrací - v pásmu 1 – 800 Hz
- spektrum zrychlení vibrací - v pásmu 1 – 25 600 Hz
- celková energie - v pásmu 500 – 25 000 Hz

Pro každou charakteristiku bylo zvoleno různé frekvenční pásmo a odlišný počet vzorků, což je vidět na obrázku 19. Po porovnání hodnot ve všech směrech byl zvolen jako optimální horizontální směr, ve kterém jsou hodnoty nejvýraznější.



**Obr. 19:** Okno analyzačního softwaru DDS 2011

V následujícím grafu je zobrazena celková energie vložená do procesu v pásmu 500 – 25 000 Hz s 65 536 vzorky. Hodnoty zrychlení výrazně stoupají se zvyšujícími se otáčkami vřetena. Při 1 600  $\text{min}^{-1}$  je střední hodnota již 1,254 g. Na velikosti zrychlení se zde také může projevovat právě nerovnost (nevyváženost), doposud neobrobeného, upnutého polotovaru. V příloze č. 3 je zobrazen graf rozběhu 1

(zvyšování otáček z 500 na 1 600 min<sup>-1</sup>). Na obrázku v příloze jsou znázorněny body, jejichž význam popisuje tabulka 12. V tabulce 12 je uvedena vzdálenost nástroje od čela obrobku, kde při nezatíženém stavu jde o aktuální polohu od čela a v záběrovém stavu se jedná o aktuální vzdálenost od čela po obrobení určité délky.

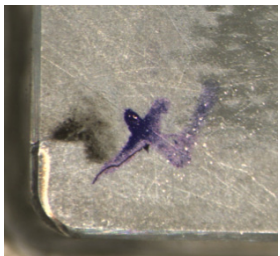
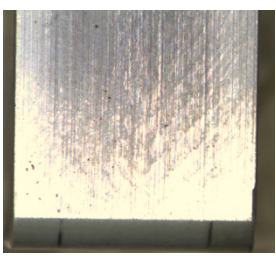
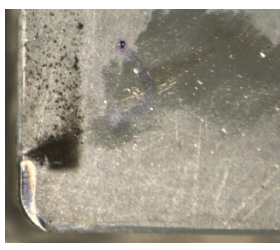

**Tab. 12:** Popis bodů

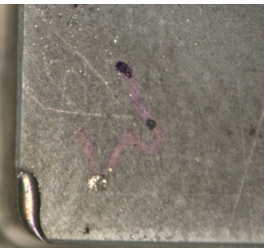
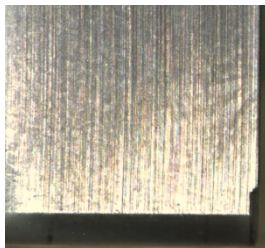
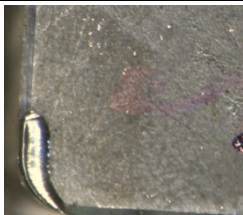
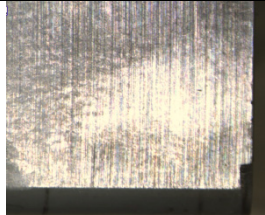

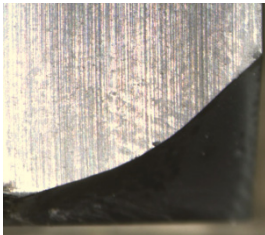
| Bod č. | Otáčky [min <sup>-1</sup> ] | Popis                        | Vzdálenost nástroje od čela obrobku po obrobení určité délky danou řeznou rychlostí [mm] |
|--------|-----------------------------|------------------------------|--|
| 1      | 500                         | soustruh v nezatíženém stavu | 0  |
| 2      | 500                         | soustruh v záběru            | 13,4   |
| 3      | 800                         | soustruh v nezatíženém stavu | 13,4   |
| 4      | 800                         | soustruh v záběru            | 53,4   |
| 5      | 1000                        | soustruh v nezatíženém stavu | 53,4   |
| 6      | 1000                        | soustruh v záběru            | 119  |
| 7      | 1250                        | soustruh v nezatíženém stavu | 119  |
| 8      | 1250                        | soustruh v záběru            | 174  |
| 9      | 1600                        | soustruh v nezatíženém stavu | 174  |
| 10     | 1600                        | soustruh v záběru            | 257 (ve vzdálenosti 249 mm vylomení bříty destičky)                                      |

Při nejvyšších zvolených otáčkách došlo již k enormnímu nárůstu vibrací a k vylomení bříty destičky – na grafu zřetelné strmým stoupáním poslední úsečky (bod 9 - 10).

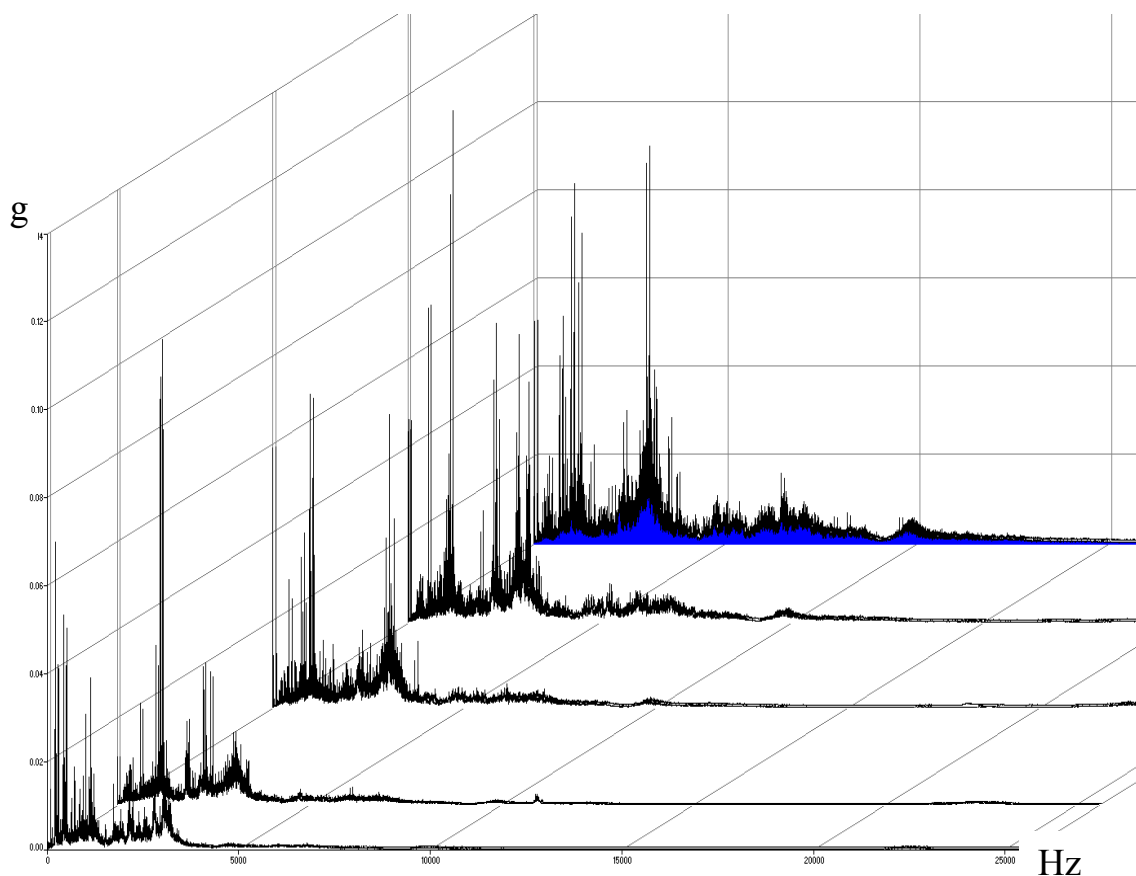
V tabulce 13 je zobrazen pouze pro názornost postup otupování břitové destičky na jejím hřbetě a čele.

**Tab. 13:** Postupné otupení nástroje (čelo - hřbet)

| otáčky [min <sup>-1</sup> ] | Opotřebení čela   | Opotřebení hřbetu  |
|-----------------------------|---|--|
| 500                         |  |  |
| 800                         |  |  |

|      |   |  |
|------|---|--|
| 1000 |  |  |
| 1250 |  |  |
| 1600 |  |  |

Frekvenční spektrum dává komplexní pohled na naměřené vibrační signály. Na obrázku 21 je zobrazeno frekvenční spektrum zrychlení vibrací ve druhém (horizontálním) kanálu. Spektrum je zobrazeno kaskádově a jako referenční spektrum je zvoleno čtvrté spektrum v pořadí. Referenční spektrum je označeno modrou barvou.



Obr. 21: Frekvenční spektrum

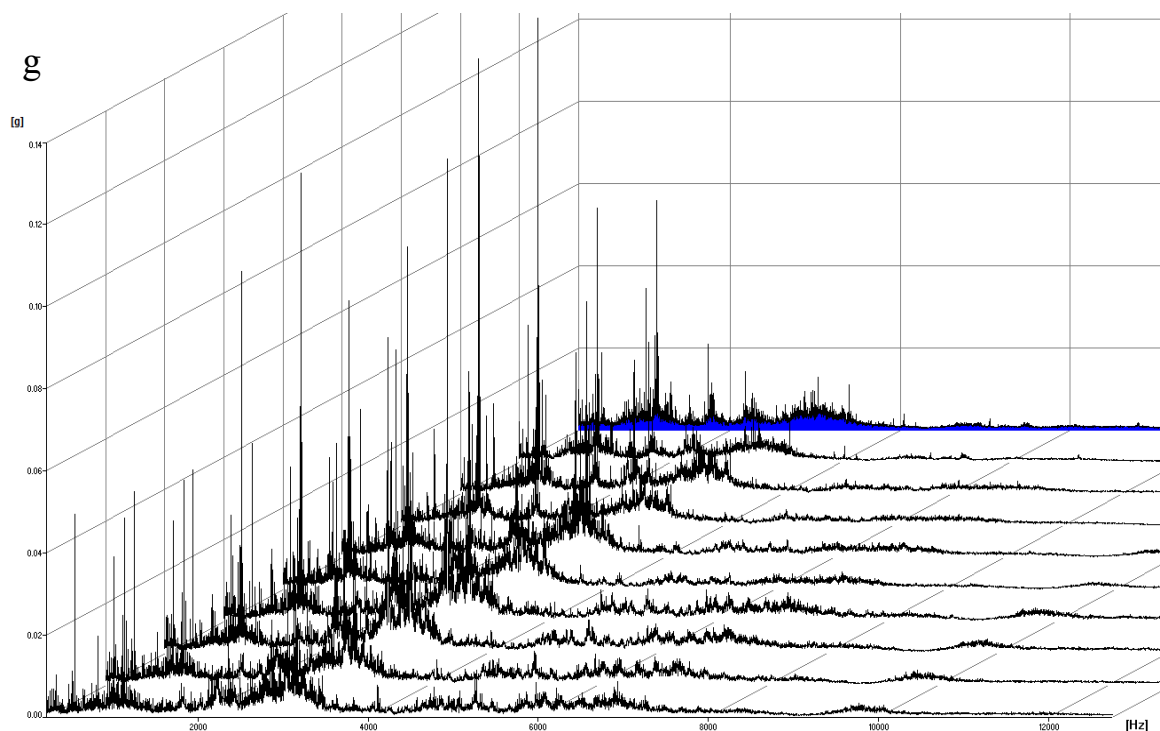


Pro druhý rozběh, tj. otáčky klesají ( $1250 - 500 \text{ min}^{-1}$ ), hodnoty zrychlení vibrací výrazně klesají. V příloze č. 4 je zobrazen graf rozběhu 2 (snižování otáček z  $1250$  na  $500 \text{ min}^{-1}$ ). Na obrázku v příloze je znázorněn popis bodů a v následující tabulce je popsán jejich význam. Z grafu vyplývá, že při  $1250$  otáčkách vřetena je zrychlení  $0,996 \text{ g}$  a při  $500$  otáčkách pak  $0,3828 \text{ g}$ . V tabulce 14 je uvedena vzdálenost nástroje od čela obrobku, kde při nezatíženém stavu jde o aktuální polohu od čela a v záběrovém stavu se jedná o aktuální vzdálenost od čela po obrobení určité délky.

**Tab. 14:** Popis bodů

| Bod č. | Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ] | Popis                        | Vzdálenost nástroje od čela obrobku po obrobení určité délky danou řeznou rychlostí [mm] |
|--------|------------------------------|------------------------------|--|
| 1      | 1250                         | soustruh v nezatíženém stavu | 257  |
| 2      | 1250                         | soustruh v záběru            | 316  |
| 3      | 1000                         | soustruh v nezatíženém stavu | 316  |
| 4      | 1000                         | soustruh v záběru            | 363  |
| 5      | 800                          | soustruh v nezatíženém stavu | 363  |
| 6      | 800                          | soustruh v záběru            | 400  |
| 7      | 500                          | soustruh v nezatíženém stavu | 400  |
| 8      | 500                          | soustruh v záběru            | 423  |

Na následujícím obrázku je graf frekvenčního spektra zrychlení vibrací ve druhém (horizontálním) kanálu. Spektrum je zobrazeno kaskádově a jako referenční spektrum je zvoleno čtvrté spektrum v pořadí. Referenční spektrum je označeno modrou barvou. Z grafu je dobře vidět, že u prvních rozběhů jsou hodnoty nižší, uprostřed stoupají

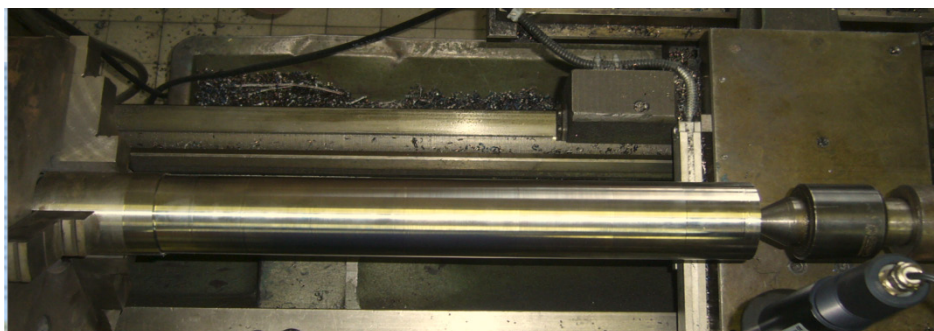


**Obr. 23:** Frekvenční spektrum druhého rozběhu

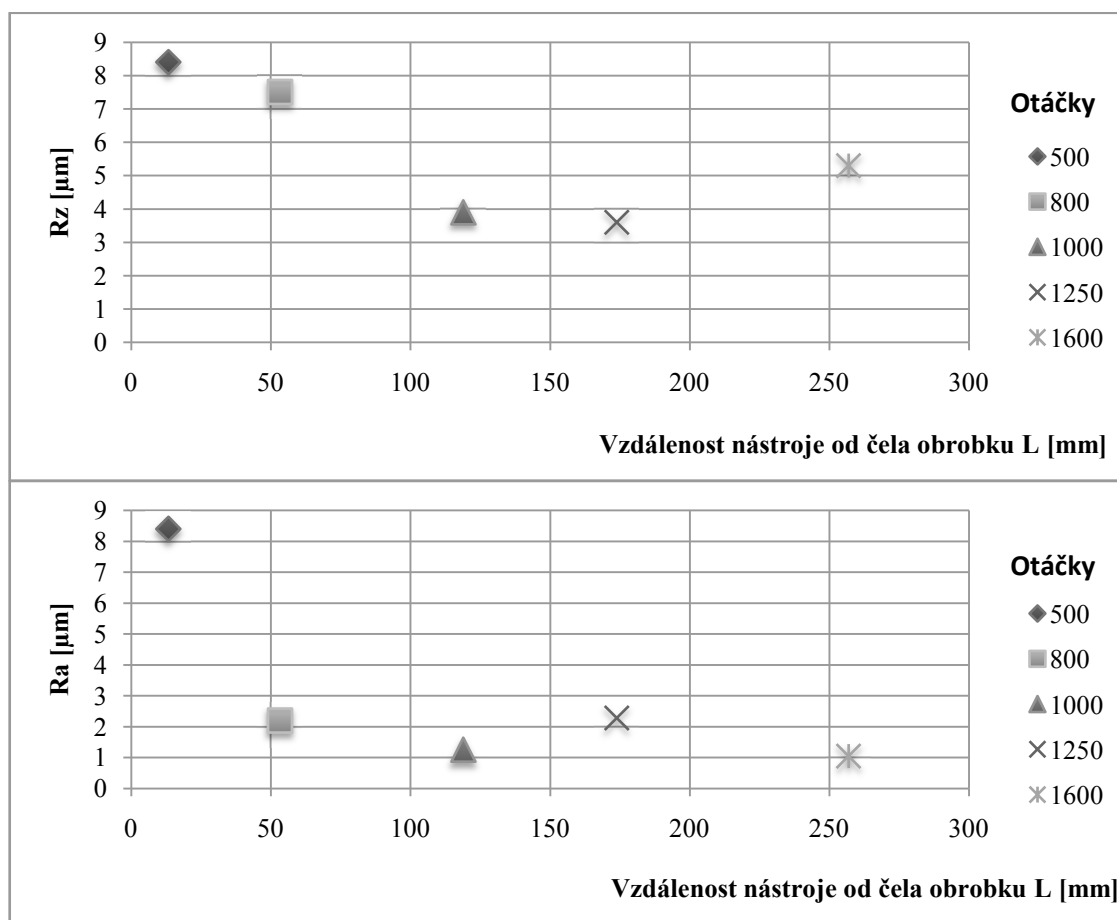
(průhyb hřídele) a na konci je vidět mírný pokles (blízko sklíčidla). Referenční spektrum ukazuje, že rozdíly mezi zatíženým a nezatíženým strojem nevykazují velké rozdíly, a tak je velmi obtížné nalézt pásmo, ve kterém se projeví přímo vliv vibrací na opotřebení nástroje.

V následujícím kroku je popsáno zhodnocení kvality obrobeného povrchu po prvním experimentu.

Při tomto experimentu bylo nutné brát v potaz délku obráběné součásti, její upnutí a aktuální vzdálenost nástroje od čela součásti. Na obrázku 24 je zobrazena součást po provedení prvního experimentu. Dosažená jakost povrchu je zobrazena v grafu na obrázku 25, kde  $L$  = obrobená délka od čela obrobku.



**Obr. 24:** Obráběná součást po provedení prvního experimentu



**Obr. 25:** Velikost drsnosti povrchu se změnou délky od čela (první část experimentu)

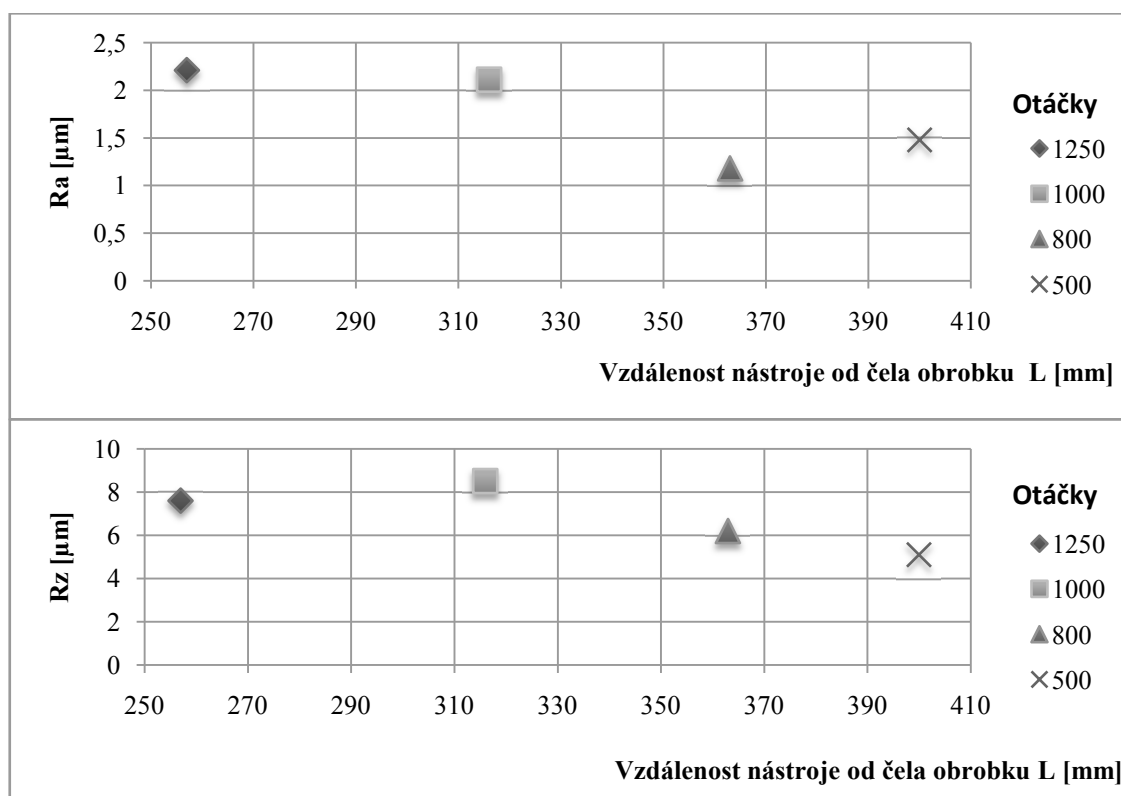


Během tohoto měření bylo dosaženo velmi dobré kvality povrchu. Pouze při prvním záběru od čela obrobku byla změřena střední aritmetická drsnost  $R_a = 2,2 \mu\text{m}$ , a  $R_z = 7,5 \mu\text{m}$ . Vzhledem k tomu, že destička byla nová, a tak doposud bez opotřebení, mohly by se tyto hodnoty považovat pro destičku za záběhové.

Na obrázku 26 je zobrazen graf závislosti velikosti drsnosti povrchu na změně obrobené délky od čela obrobku pro druhou část experimentu 1. Při tomto měření dosahuje drsnost povrchu průměrně  $R_a = 1,5 \mu\text{m}$  a  $R_z = 6 \mu\text{m}$ , což je velmi dobrý výsledek.

Měření mohlo být zkresleno nerovnostmi doposud neobrobeného povrchu (obvodové házení) a volbou umístění snímačů ve velké vzdálenosti od měřeného místa. Při 500 otáčkách se ve frekvenčním spektru objevuje periodický děj, který vychází nejpravděpodobněji z převodovky soustruhu a svědčí o jejím horším stavu.

Na obrázku 26 je zobrazena dosažená drsnost povrchu při různých řezných rychlostech a změně polohy nástroje od čela obrobku.



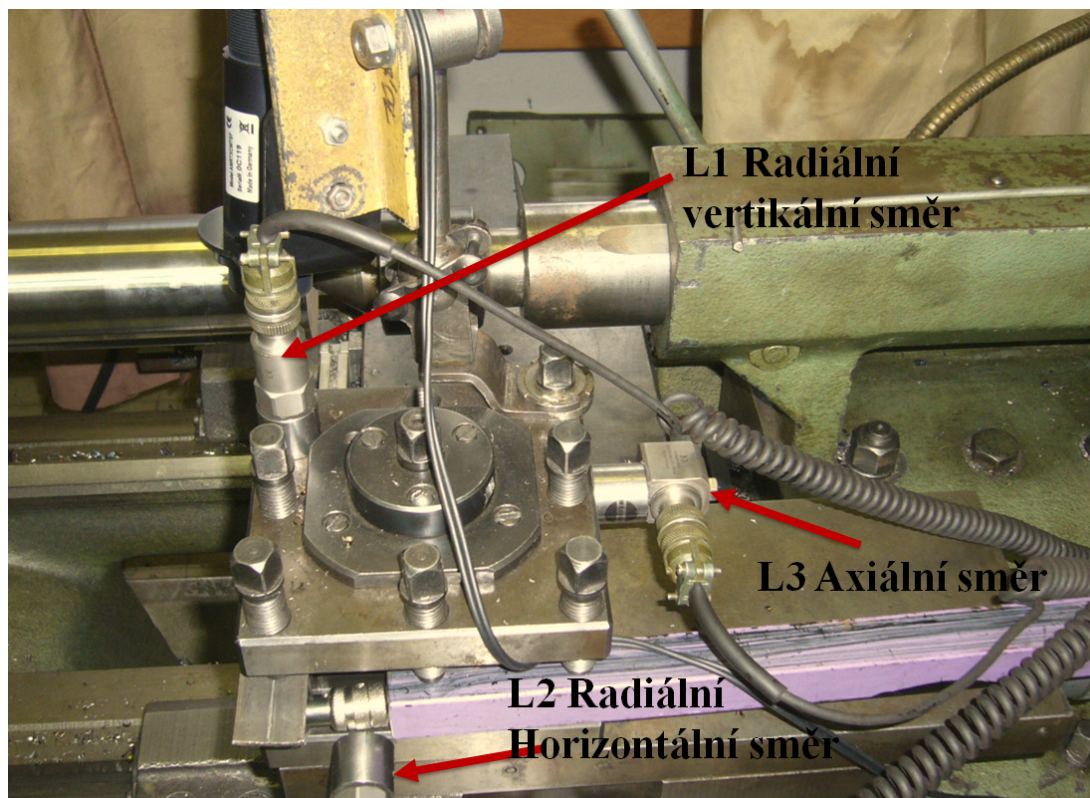
**Obr. 26:** Velikost drsnosti povrchu se změnou délky od čela (druhá fáze experimentu)

## 2.4 Druhá část experimentu

Druhá část experimentu probíhala odlišným způsobem než experiment první. Hlavní rozdíly byly: snímače vibrací byly připevněny přímo na nožový držák suportu

stroje (obrázek 27), díky této změně je možno sledovat vlivy vibrací přímo na obráběcím procesu (vlivy upnutí – podepření, až po řezný odpor). Dále byla použita odlišná břitová destička KYOCERA KS6000 s nanesenou odporovou vrstvou (viz kapitola 1.12).

Před druhým experimentem proběhlo zarovnání obrobku na průměr  $D = 69,8$  mm a délku  $l = 435$  mm, aby se vyloučily vlivy přechodů, vzniklých v první části experimentu, pro další měření.



**Obr. 27:** Umístění snímačů pro druhý experiment

Parametry obrábění spolu s naměřenými hodnotami jsou zobrazeny v následujících tabulkách. I zde se měnila řezná rychlost a velikost posuvu. Hloubka záběru byla konstantní, a to: 1,5 mm. Vždy po odebrání jedné třísky byla změřena drsnost povrchu ( $R_a$ ,  $R_z$ ) a velikost opotřebení destičky na jejím čele a hřbetu. [12]

Experiment probíhal tak, že se obrábělo vždy jednou hranou destičky až do jejího úplného opotřebení (po dané kritérium opotřebení 0,55 mm), a následně byla použita nová hrana a pokračovalo se v obrábění.

Hodnoty vibrací ve všech třech směrech naměřené přístrojem Adash A4400 – VA4Pro byly analyzovány v programu Virtual Unit. Postup měření a jeho výsledky jsou popsány v následující kapitole (2.4.1).

**Tab. 15:** Volené a naměřené hodnoty

| HRANA 1    | D [mm] | L [mm] | t [min] | n [min-1] | vc [m/min] | f [mm/ot] | VB [mm] | Vbmax [mm] | Ra [μm] | Rz [μm] |
|------------|--------|--------|---------|-----------|------------|-----------|---------|------------|---------|---------|
| 1. měření  | 68,3   | 52     | 0,44    | 800       | 179        | 0,15      | 0,03    | 0,05       | 6,18    | 24,1    |
| 2. měření  | 68,3   | 64     | 0,52    | 800       | 179        | 0,15      | 0,05    | 0,07       | 4,36    | 17,6    |
| 3. měření  | 68,3   | 134    | 1,16    | 800       | 179        | 0,15      | 0,19    | 0,25       | 0,51    | 2,2     |
| 4. měření  | 68,3   | 169    | 1,34    | 800       | 179        | 0,15      | 0,39    | 0,46       | 1,53    | 6,6     |
| 5. měření  | 65,2   | 105    | 0,9     | 800       | 172        | 0,15      | 0,46    | 0,58       | 1,35    | 5,1     |
| HRANA 2    | D [mm] | L[mm]  | t[min]  | n[ot/min] | vc[m/min]  | f[mm/ot]  | VB[mm]  | VBmax[mm]  | Ra [μm] | Rz [μm] |
| 1. měření  | 65,2   | 53     | 0,25    | 800       | 172        | 0,3       | 0,02    | 0,03       | 2,03    | 13,5    |
| 2. měření  | 65,2   | 50     | 0,2     | 800       | 172        | 0,3       | 0,06    | 0,09       | 1,56    | 6,9     |
| 3. měření  | 65,2   | 52     | 0,22    | 800       | 172        | 0,3       | 0,09    | 0,11       | 1,47    | 5,1     |
| 4. měření  | 65,2   | 58     | 0,27    | 800       | 172        | 0,3       | 0,11    | 0,14       | 1,48    | 5,7     |
| 5. měření  | 65,2   | 102    | 0,42    | 800       | 172        | 0,3       | 0,19    | 0,23       | 1,39    | 4,8     |
| 6. měření  | 62,4   | 78     | 0,33    | 800       | 164        | 0,3       | 0,24    | 0,35       | 1,09    | 4,5     |
| 7. měření  | 62,4   | 82     | 0,35    | 800       | 164        | 0,3       | 0,31    | 0,48       | 1,78    | 8,5     |
| 8. měření  | 62,4   | 79     | 0,33    | 800       | 164        | 0,3       | 0,44    | 0,62       | 2,57    | 11      |
| HRANA 3    | D [mm] | L[mm]  | t[min]  | n[ot/min] | vc[m/min]  | f[mm/ot]  | VB[mm]  | VBmax[mm]  | Ra [μm] | Rz [μm] |
| 1. měření  | 62,4   | 64     | 0,2     | 800       | 164        | 0,6       | 0,25    | 0,38       | 6,4     | 27,1    |
| 2. měření  | 62,4   | 86     | 0,2     | 800       | 164        | 0,6       | 0,45    | 0,61       | 5,98    | 25,9    |
| HRANA 4    | D [mm] | L[mm]  | t[min]  | n[ot/min] | vc[m/min]  | f[mm/ot]  | VB[mm]  | VBmax[mm]  | Ra [μm] | Rz [μm] |
| 1. měření  | 59,3   | 79     | 0,43    | 1250      | 235        | 0,6       | 0,12    | 0,15       | 6,63    | 34,2    |
| 2. měření  | 59,3   | 82     | 0,44    | 1250      | 235        | 0,6       | 0,35    | 0,42       | 1,8     | 7,5     |
| 3. měření  | 59,3   | 80     | 0,43    | 1250      | 235        | 0,6       | 0,51    | 0,62       | 1,23    | 6       |
| HRANA 5    | D [mm] | L[mm]  | t[min]  | n[ot/min] | vc[m/min]  | f[mm/ot]  | VB[mm]  | VBmax[mm]  | Ra [μm] | Rz [μm] |
| 1. měření  | 59,3   | 81     | 0,38    | 1600      | 314        | 0,6       | 0,29    | 0,38       | 0,77    | 3,1     |
| 2. měření  | 59,3   | 75     | 0,32    | 1600      | 314        | 0,6       | 0,56    | 0,78       | 1,11    | 4,2     |
| HRANA 6    | D [mm] | L[mm]  | t[min]  | n[ot/min] | vc[m/min]  | f[mm/ot]  | VB[mm]  | VBmax[mm]  | Ra [μm] | Rz [μm] |
| 1. měření  | 56,3   | 78     | 0,81    | 630       | 117        | 0,6       | 0,02    | 0,04       | 0,66    | 2,9     |
| 2. měření  | 56,3   | 81     | 0,82    | 630       | 117        | 0,6       | 0,04    | 0,06       | 0,61    | 2,9     |
| 3. měření  | 56,3   | 80     | 0,81    | 630       | 117        | 0,6       | 0,06    | 0,09       | 0,63    | 3,9     |
| 4. měření  | 56,3   | 80     | 0,81    | 630       | 117        | 0,6       | 0,08    | 0,11       | 0,57    | 3,9     |
| 5. měření  | 56,3   | 113    | 1,14    | 630       | 117        | 0,6       | 0,1     | 0,14       | 1       | 3,9     |
| 6. měření  | 53,4   | 79     | 0,82    | 630       | 111        | 0,6       | 0,11    | 0,16       | 0,94    | 4,3     |
| 7. měření  | 53,4   | 80     | 0,83    | 630       | 111        | 0,6       | 0,13    | 0,18       | 1,35    | 5,4     |
| 8. měření  | 53,4   | 79     | 0,81    | 630       | 111        | 0,6       | 0,16    | 0,2        | 0,97    | 5,1     |
| 9. měření  | 53,4   | 179    | 1,83    | 630       | 111        | 0,6       | 0,2     | 0,26       | 1,11    | 6,4     |
| 10. měření | 50,6   | 158    | 1,64    | 630       | 106        | 0,6       | 0,3     | 0,34       | 1,03    | 5       |
| 1. měření  | 50,6   | 159    | 1,64    | 630       | 106        | 0,6       | 0,45    | 0,51       | 0,95    | 3,6     |
| 2. měření  | 50,6   | 94     | 0,97    | 630       | 106        | 0,6       | 0,49    | 0,59       | 0,95    | 3,9     |
| 13. měření | 47,9   | 13     | 0,14    | 630       | 100        | 0,6       | 0,5     | 0,6        | 0,98    | 5       |

V tabulce 15 jsou přehledně zaznamenány parametry obrábění. Zelenou barvou jsou označena měření, kdy se obrábělo znovu od čela obrobku. Oranžová barva v tabulce značí logicky konec obrábění – vylomení destičky (přerušení odporu).

Uvedený průměr D je průměr po obrobení o danou hloubku záběru. Vychází se tedy z průměru 69,8 mm. Uvedená délka L je délka obrobení, nikoliv vzdálenost od čela obrobku.

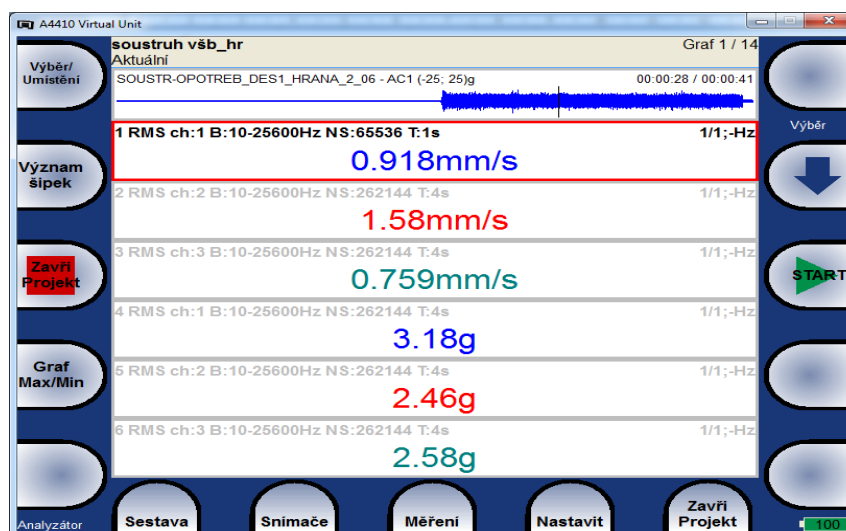
#### 2.4.1 Vyhodnocení hodnot naměřených přístrojem A4400 - VA4Pro

Záznam proběhl pomocí modulu „REKORDÉR“, díky němu je signál nahráván do přístroje. Jedná se o tzv. časový záznam, který je následně analyzován. Toto má spoustu výhod, jednou z nich je možnost opakovaně signál přehrávat a zkoumat. Další výhodou je současné nahrávání ze všech čtyř vstupů AC, DC a tachometru. V tomto případě byly použity AC vstupy. Vzorkovací frekvence je v rozmezí od 64 Hz do 196 000 Hz. Délka záznamu závisí na vnitřní paměti přístroje.

Měřeny byly následující parametry a charakteristiky, vždy ve všech třech směrech:

- |                                       |                           |
|---------------------------------------|---------------------------|
| • efektivní hodnoty rychlosti vibrací | - v pásmu 10 – 1000 Hz    |
| • časový záznam rychlosti vibrací;    | - v pásmu 1 – 6400 Hz     |
| • efektivní hodnoty zrychlení vibrací | - v pásmu 500 – 25 600 Hz |
| • časový záznam zrychlení vibrací     | - v pásmu 1 – 25 600 Hz   |
| • spektrum rychlosti vibrací          | - v pásmu 1 – 800 Hz      |
| • spektrum zrychlení vibrací          | - v pásmu 1 – 25 600 Hz   |
| • celková energie                     | - v pásmu 500 – 25 000 Hz |

Pro každou charakteristiku bylo zvoleno různé frekvenční pásmo a odlišný počet vzorků, což je vidět na obrázku 28. Po porovnání hodnot ve všech směrech byl zvolen jako optimální horizontální směr, ve kterém jsou hodnoty nejvýraznější (obr. 28).



Obr. 28: Okno analyzačního softwaru

Vzhledem k velkému rozsahu měření jsou téměř pro všechny použité hrany destičky (celkem 6) uvedeny grafy závislosti opotřebení hřbetu (VBmax) na rychlosti vibrací zaznamenaných v horizontálním směru. Dále jsou zobrazeny grafy závislosti rychlosti vibrací na drsnosti povrchu. Efektivní rychlost vibrací je zaznamenána v pásmu 10 Hz – 25 600 Hz, s 262 144 vzorky.

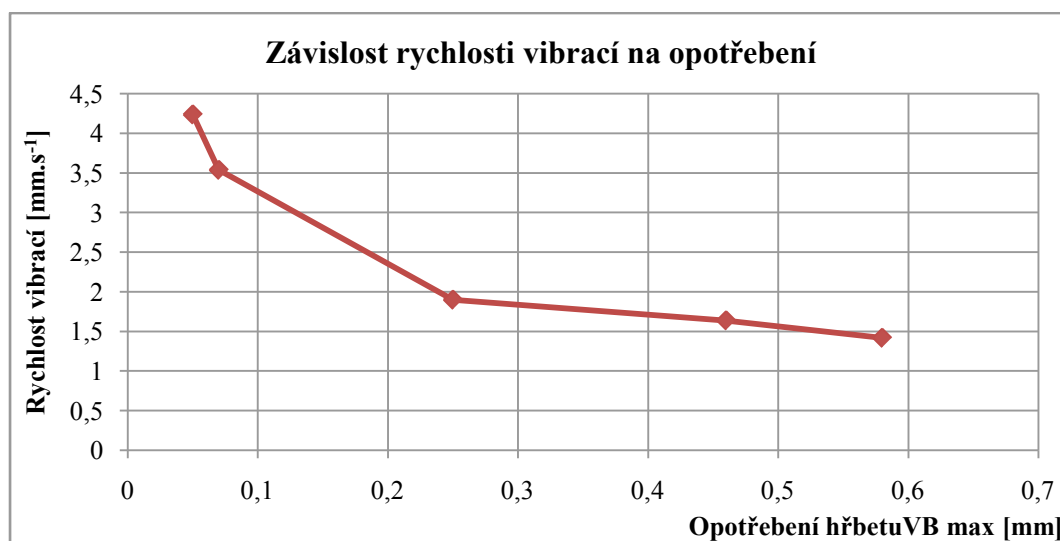
U čtvrté hrany destičky došlo ke vzniku velkých vibrací v prvních 50 mm od čela obrobku.

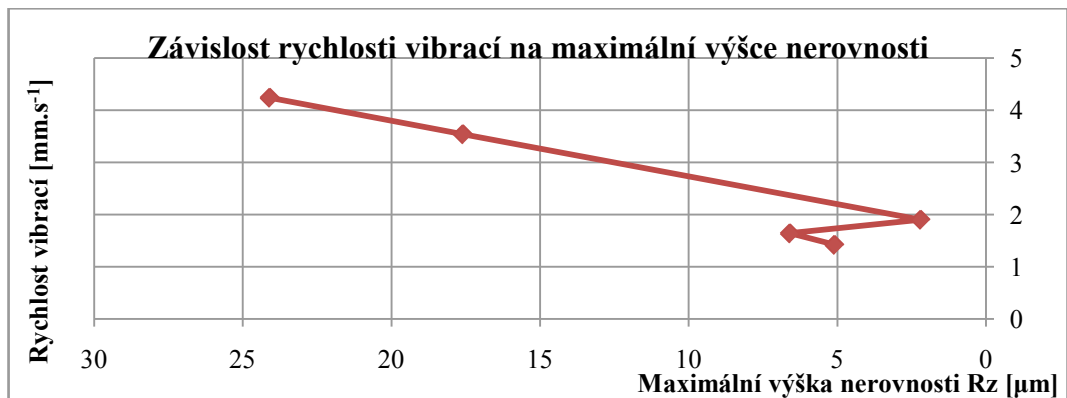
U hrany č. 6 byla řezná rychlost v rozmezí od  $117 \text{ m.min}^{-1}$  –  $100 \text{ m.min}^{-1}$ , tady byla trvanlivost řezného materiálu nejvyšší. Bylo nutné čtyřikrát začínat obrábění znovu od čela obrobku, než došlo k úplnému opotřebení řezného materiálu. Z tohoto důvodu bude hrana č. 6 podrobněji rozebrána.

### 1) HRANA 1:

Při obrábění součásti první hranou destičky proběhlo celkem pět záběrů do jejího úplného otupení, řeznou rychlostí  $v_c = 179 \text{ m.min}^{-1}$ . Hodnoty vibrací byly na začátku obrábění, tj. u čela obrobku, až třikrát vyšší než na konci. Přestože poslední záběr probíhal znovu od čela, ale se sníženou řeznou rychlostí díky změně průměru ( $v_c = 172 \text{ m.min}^{-1}$ ). Tuto situaci lze přisuzovat špatnému stavu podpěrného hrotu, který s největší pravděpodobností způsobuje při určitých otáčkách rezonanci, a tím způsobí rozkmitání celé soustavy.

Na obrázku 29 je graf závislosti efektivní rychlosti vibrací na velikosti opotřebení hřbetu řezné destičky, a také na maximální výšce nerovnosti (Rz).





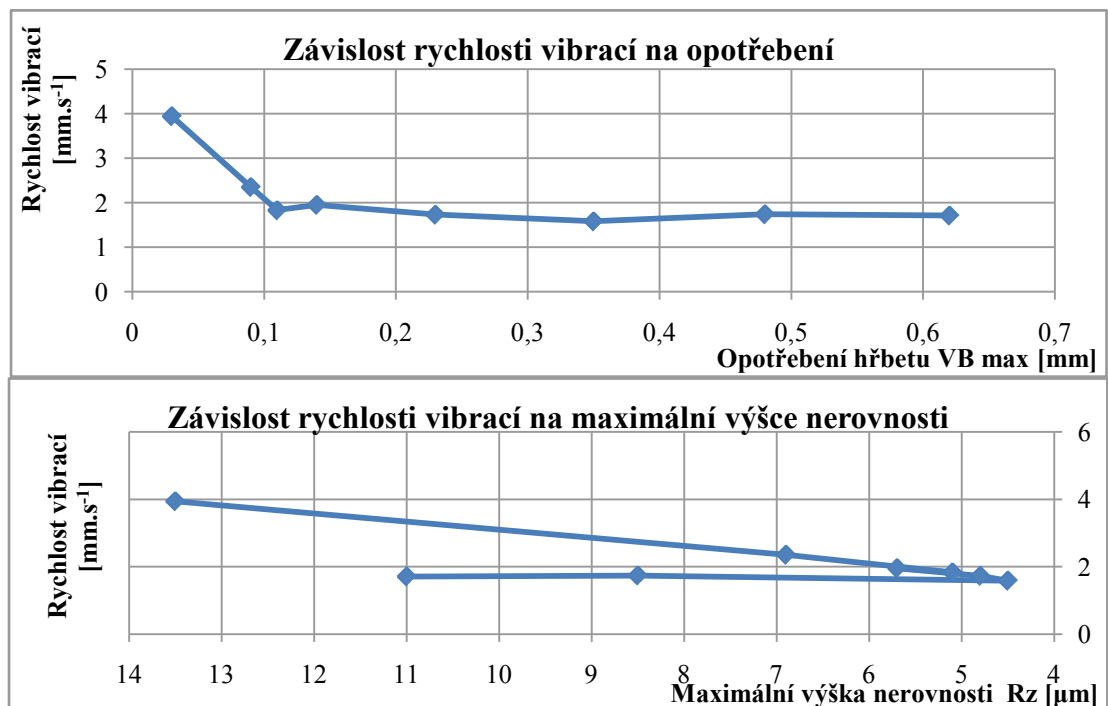
**Obr. 29:** Grafy – hrana 1

Z grafů je dobře vidět, že vzhledem ke špatnému stavu koníku je největší výška nerovnosti od čela obrobku velmi vysoká. Snižuje se se vzrůstající vzdáleností. Dále také se zvyšujícím se opotřebením se snižuje vliv koníku a zvyšuje Rz. Vliv má samozřejmě i průhyb obrobku. Na podpoření této teorie by se však muselo udělat ještě více experimentů s podobnými parametry (vzdálenost od sklícidla aj.).

## 2) HRANA 2:

U druhé hrany proběhlo celkem osm měření do otupení destičky po stanovené kritérium opotřebení. Hodnoty rychlosti vibrací jsou podobné jako u první hrany. Od čela obrobku vyšší, ale jen asi dvojnásobně, díky změně velikosti posuvu z hodnoty 0,15 na 03.

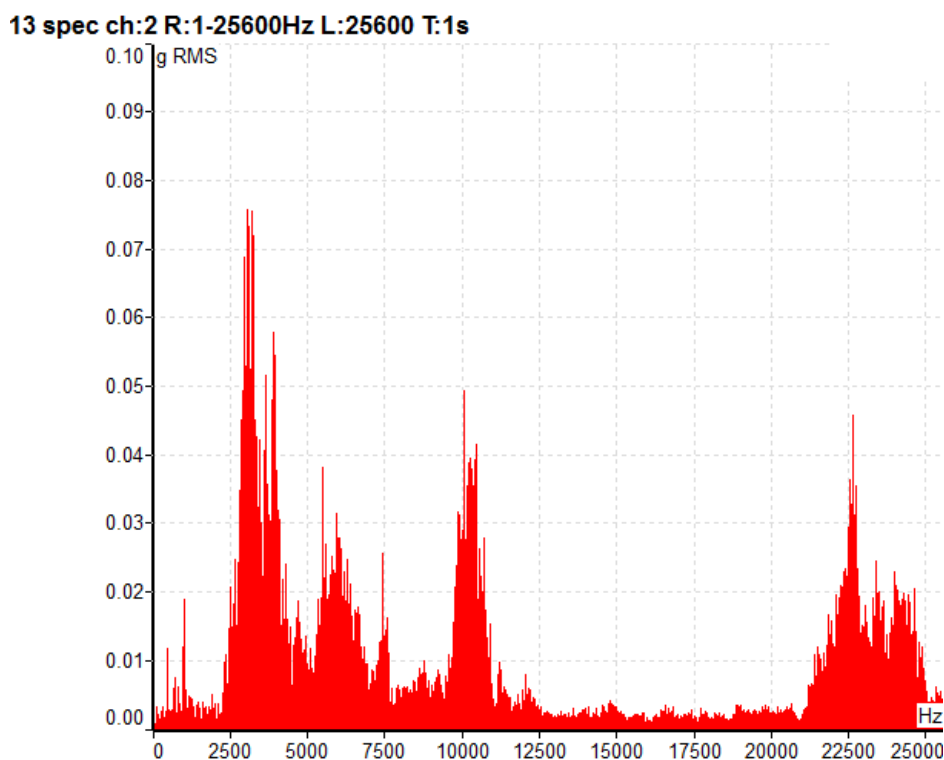
Ve vzdálenosti 194 mm od čela obrobku se došlo k vylomení břitu destičky a přerušil se elektrický obvod, odtud potom naměřená  $R_z = 18,9 \mu\text{m}$  a  $R_a = 4 \mu\text{m}$ .



**Obr. 30:** Grafy – hrana 2

Do bodu č. 6 na grafu je zaznamenán pokles vibrací a zlepšování kvality povrchu (přibližování ke sklíčidlu) a od bodu 6 dál (obrábění znovu od čela) je vidět stagnace vibrací, přičemž se zhoršuje jakost povrchu s rostoucím opotřebením břitové destičky.

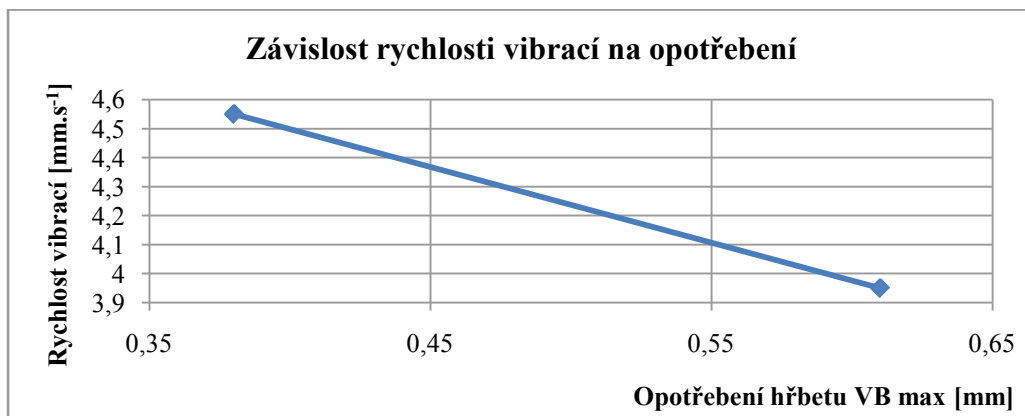
Z frekvenčního spektra efektivních hodnot zrychlení vibrací z horizontálního směru je patrný nárůst vibrací u konce obrábění, kde došlo k úplnému otupení břitové destičky a ke zhoršení jakosti povrchu.



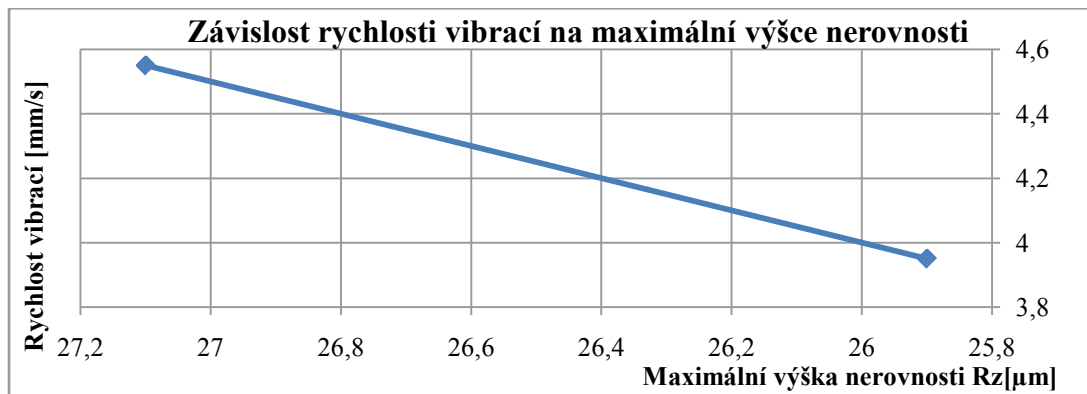
**Obr. 31:** Frekvenční spektrum – hrana 2

### 3) HRANA 3:

Třetí hrana destičky byla otupena již po druhém záběru. Obrobená délka činila pouze 150 mm. Zaznamenané hodnoty vibrací několikrát převyšovaly hodnoty z předchozího měření. Tento děj vyvolala změna velikosti posuvu z hodnoty 0,3 na hodnotu 0,6, přičemž byla zachována řezná rychlost  $164 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Taktéž kvalita obrobeného povrchu se výrazně zhoršila, je to dobře viditelné na grafu na obrázku 32.





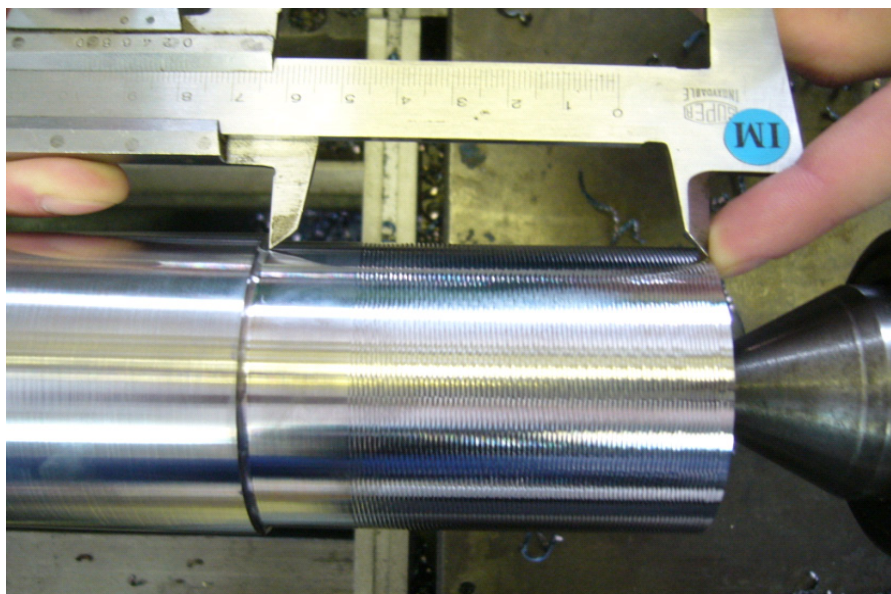


**Obr. 32:** Grafy – hrana 3

Z grafů pro hranu č. 3 je zřejmé, že hlavní roli v rychlosti opotřebení hrála velikost posuvu. Vzhledem k tomu, že obrábění zde probíhalo již velmi blízko sklíčidla, nemohl se zde ve větší míře projevit průhyb hřídele. Graf tedy potvrzuje, že hlavní roli hrála velikost posuvu, kdy k opotřebení došlo velmi rychle na relativně krátké obrobené vzdálenosti (přibližně 150 mm).

#### **4) HRANA 4:**

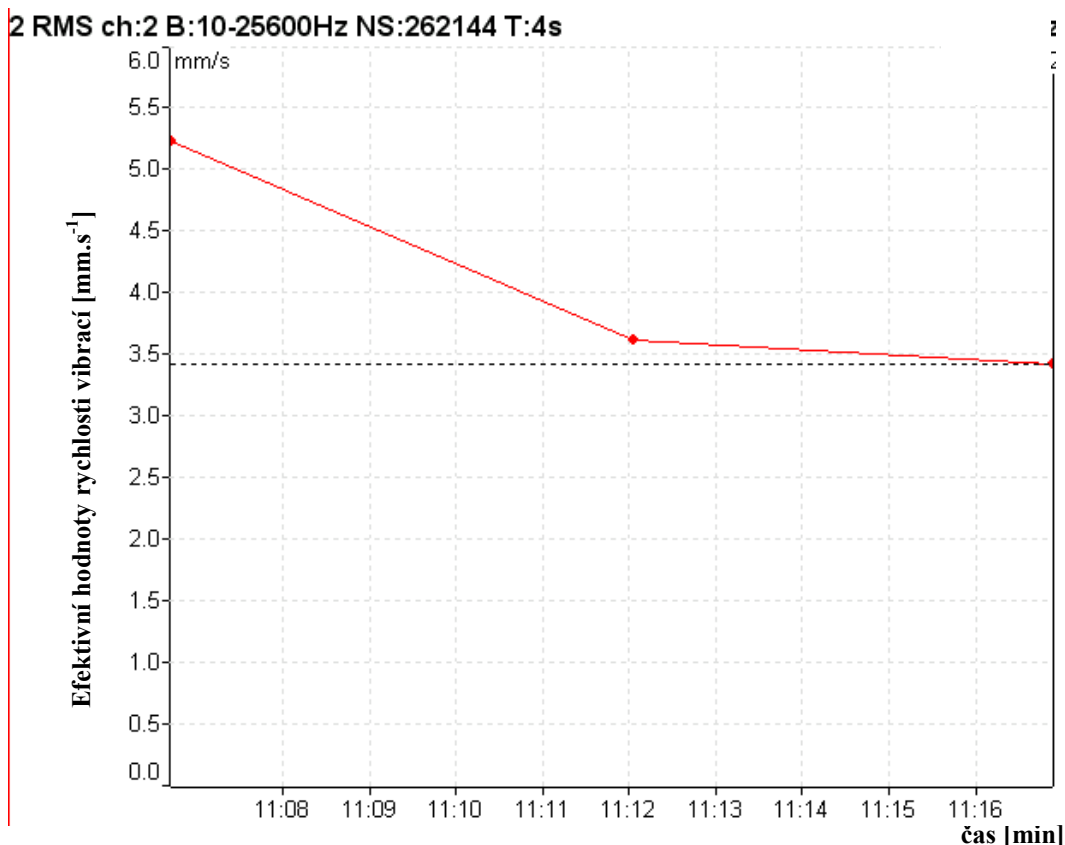
Čtvrtá hrana je zajímavá tím, že soustružení začalo od čela obrobku, řezná rychlost byla zvýšena na  $235 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a posuv byl opět  $0,6 \text{ mm/ot}$ . Velké vibrace byly zaznamenány od čela obrobku, do délky 62 mm, poté následoval pokles hodnot a zlepšení kvality obrobeného povrchu (dobře viditelné na obrázku 34). Tento jev svědčí o špatném stavu podpěrného otočného hrotu, na kterém buď nebyla prováděna dobrá údržba (mazání, vymezování radiální vůle), nebo byl zvolen hrot s lehkým uložením (pouze radiální kuličková ložiska), vhodný spíše pro malé hloubky záběrů.



**Obr. 34:** Jakost povrchu – hrana 4



Drsnost povrchu byla změřena  $Ra\ 6,63\mu m$ ,  $Rz\ 34,2\ \mu m$  do délky 62 mm a odtud dále  $Ra\ 0,52\mu m$ ,  $Rz\ 2,6\ \mu m$  (obrázek 34).



**Obr. 35:** Vývoj rychlosti vibrací (tři záběry)

Na obrázku 35 je zobrazen klesající vývoj rychlosti vibrací zaznamenaných v horizontálním směru v pásmu 10 – 25 600 Hz s 262 144 vzorky.

### 5) HRANA 5:

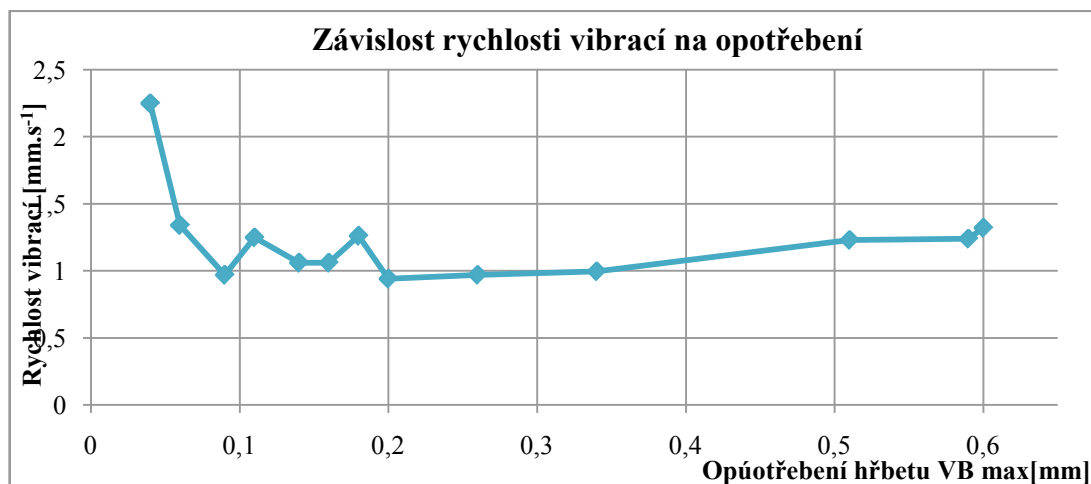
U této hrany byla řezná rychlost zvýšena na  $314\ m.min^{-1}$  a hodnota posuvu zůstala stejná. Destička vydržela pouze dva záběry, přičemž hodnoty vibrací nebyly nijak výrazné. Vzhledem k předchozím hranám, kde bylo měření ovlivněno nejspíše špatným stavem podpěrného hrotu, bylo u hrany 5 docíleno vysoké kvality obrobeneho povrchu (hodnoty v tabulce 16 – L = obrobená délka). U hrany 5 probíhalo obrábění blízko sklíčidla (začátek asi 120 mm) tzn., že i při velmi vysoké řezné rychlosti se neprojevil průhyb hřídele, ale opotřebení destičky zavinila vysoká řezná rychlost spolu s velkým posuvem.

**Tab. 16:** Hodnoty – hrana 5

| HRANA 5   | L [mm] | VBmax [mm] | Ra [ $\mu m$ ] | Rz [ $\mu m$ ] |
|-----------|--------|------------|----------------|----------------|
| 1. měření | 81     | 0,38       | 0,77           | 3,1            |
| 2. měření | 75     | 0,78       | 1,11           | 4,2            |

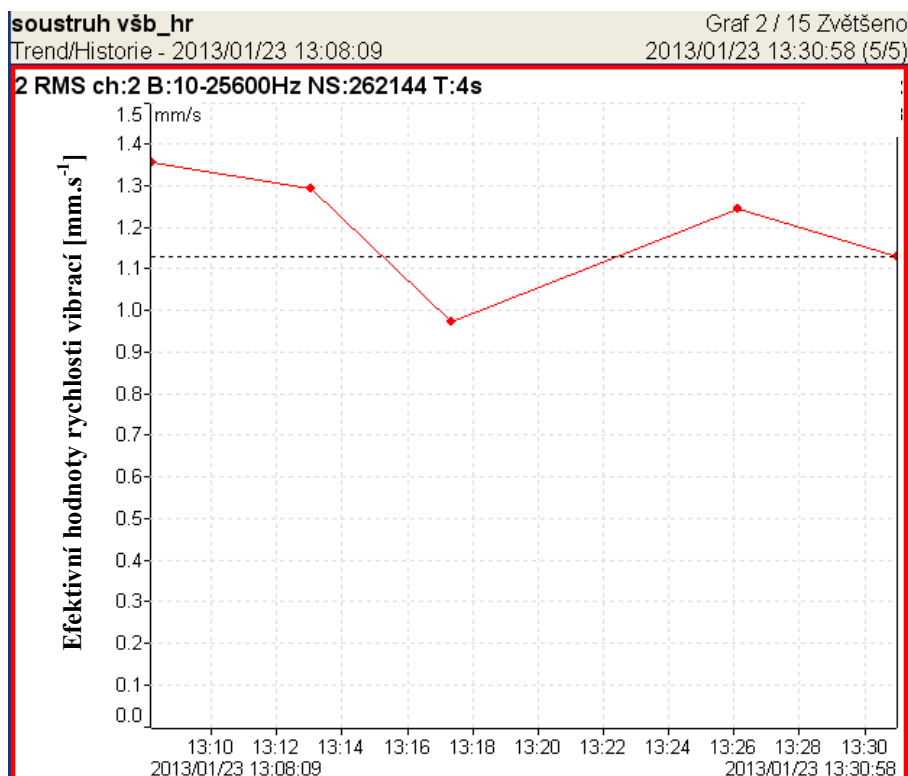
## 6) HRANA 6:

U šesté hrany se do jejího úplného opotřebení muselo začínat soustružení čtyřikrát od čela. Řezná rychlost se tedy měnila nepatrně se změnou průměru (117, 111, 106, 100  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Není tedy vhodné porovnávat drsnost povrchu s velikostí vibrací, protože při soustružení od čela jsou hodnoty vždy zkreslené díky podpěrnému hrotu. Na obrázku 36 je graf závislosti maximálního opotřebení na rychlosti vibrací. Z grafu je zřejmé, že od prvního záběru jsou hodnoty výraznější.



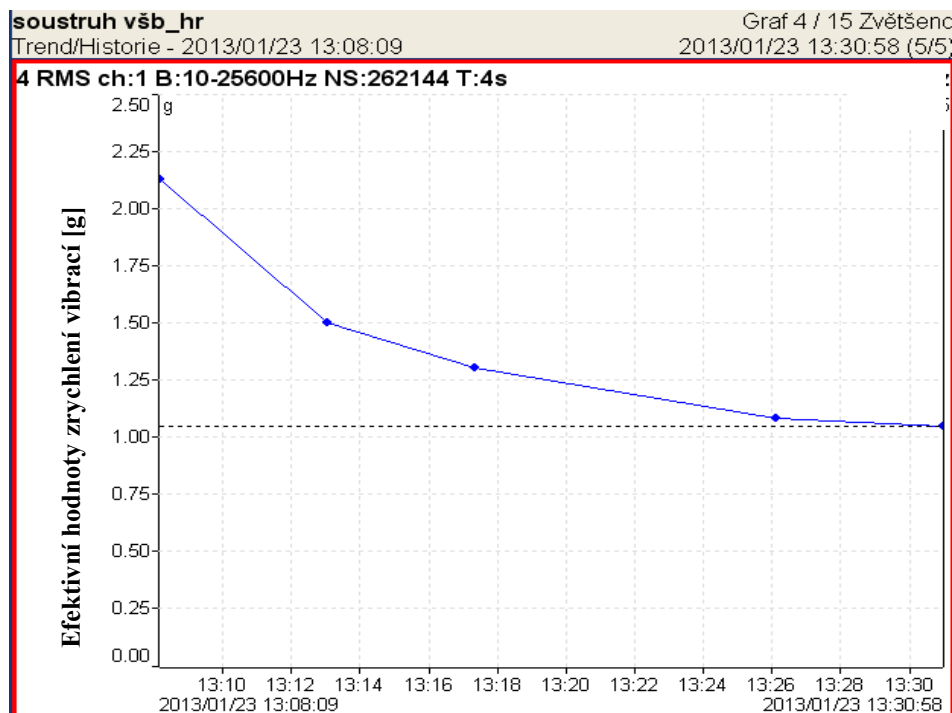
**Obr. 36:** Graf závislosti – hrana 6 (13 záběrů)

Na obrázku 37 je zobrazen vývoj vibrací získaných v horizontálním směru, v pásmu 10 – 25 600 Hz na strojním čase. Graf je pro první až pátý záběr, kdy se soustružilo vždy znovu od čela obrobku.



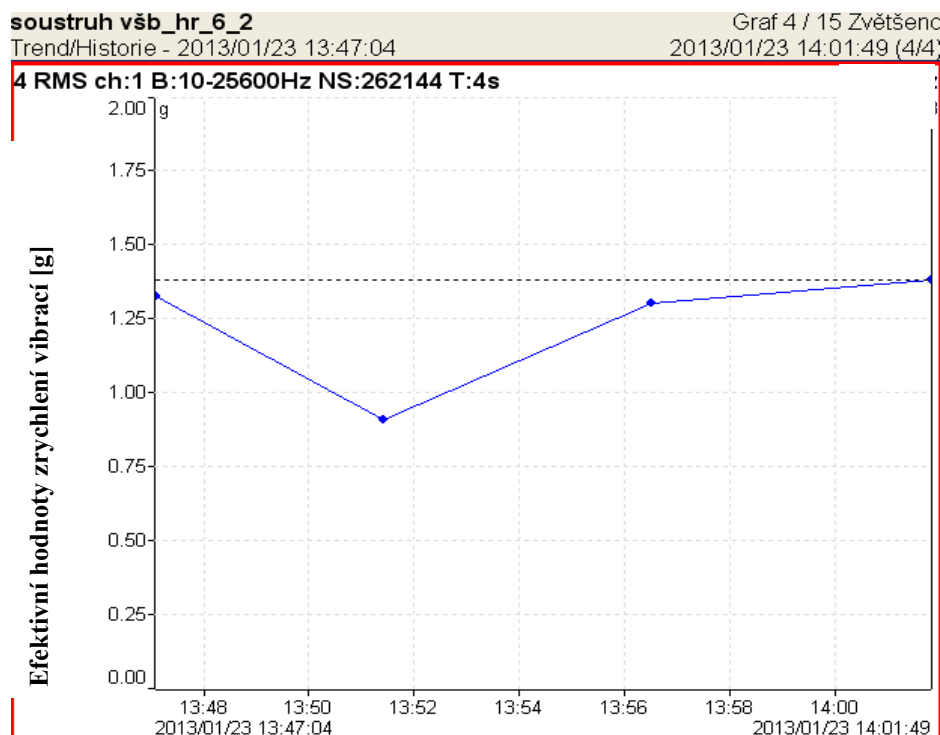
**Obr. 37:** Vývoj vibrací pro prvních pět záběrů

Na dalším obrázku je zobrazen vývoj efektivní hodnoty zrychlení vibrací pro prvních pět měření získaných z vertikálního směru. Je patrné, že s rostoucí vzdáleností od čela obrobku hodnoty klesají, dosahuje se vysoké kvality povrchu již od čela. Je to způsobeno malou řeznou rychlostí (okolo  $110 \text{ m.min}^{-1}$ ). Při těchto otáčkách se neprojevil špatný stav podpěrného hrotu. Opotřebení destičky je velmi malé.

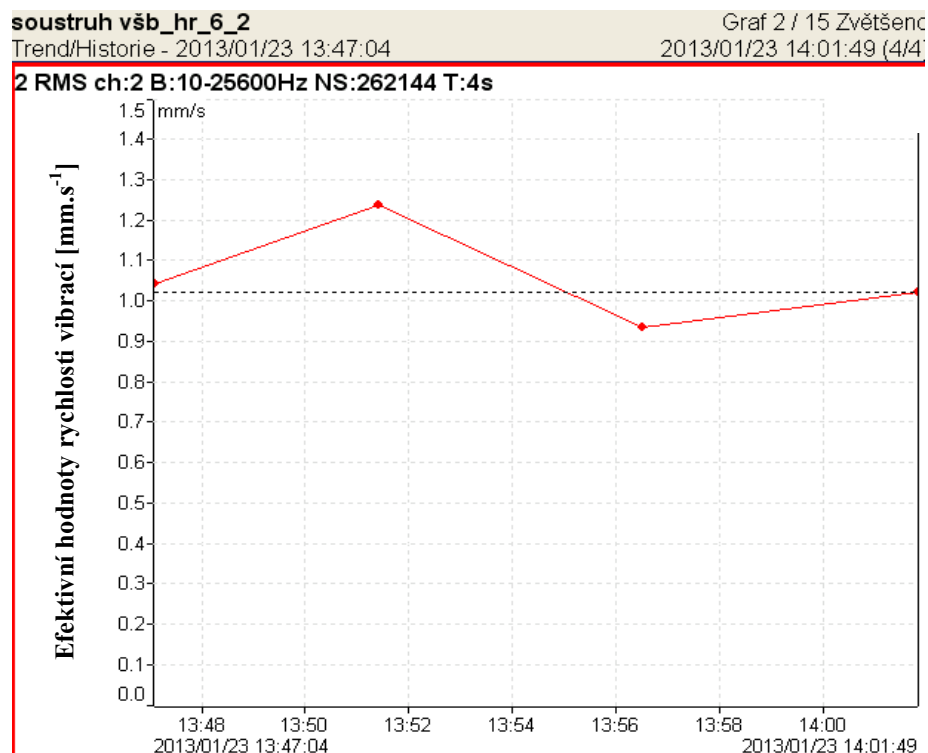


**Obr. 38:** Vývoj zrychlení vibrací pro první kanál

Další graf je pro měření 6 – 9 (soustružení znovu od čela), obr. 39 a 40.

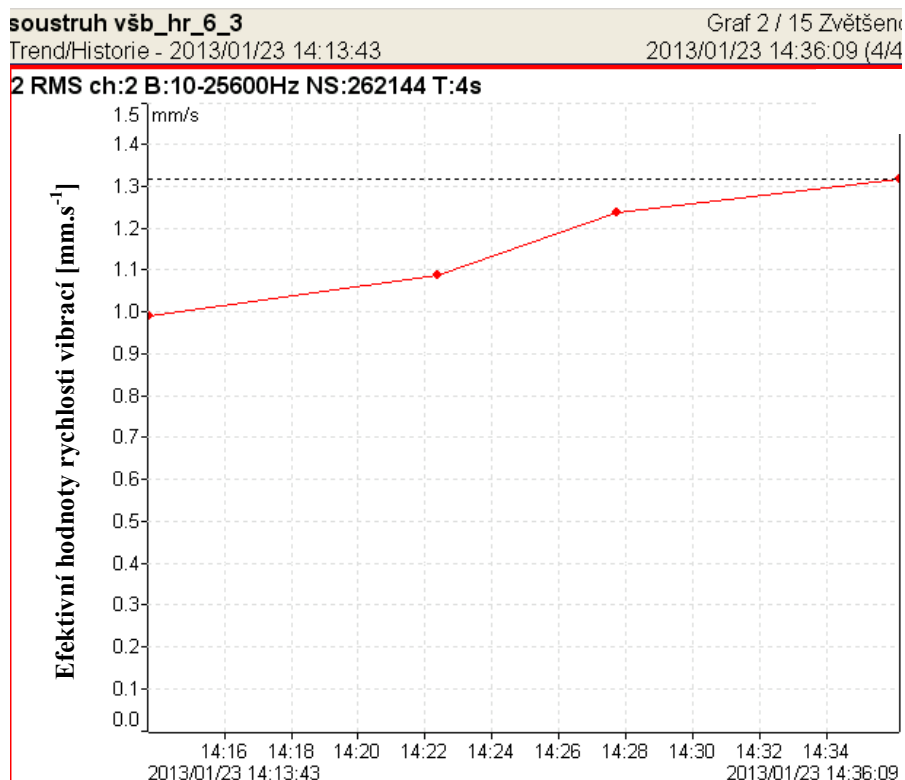


**Obr. 39:** Vývoj pro první kanál (zrychlení)

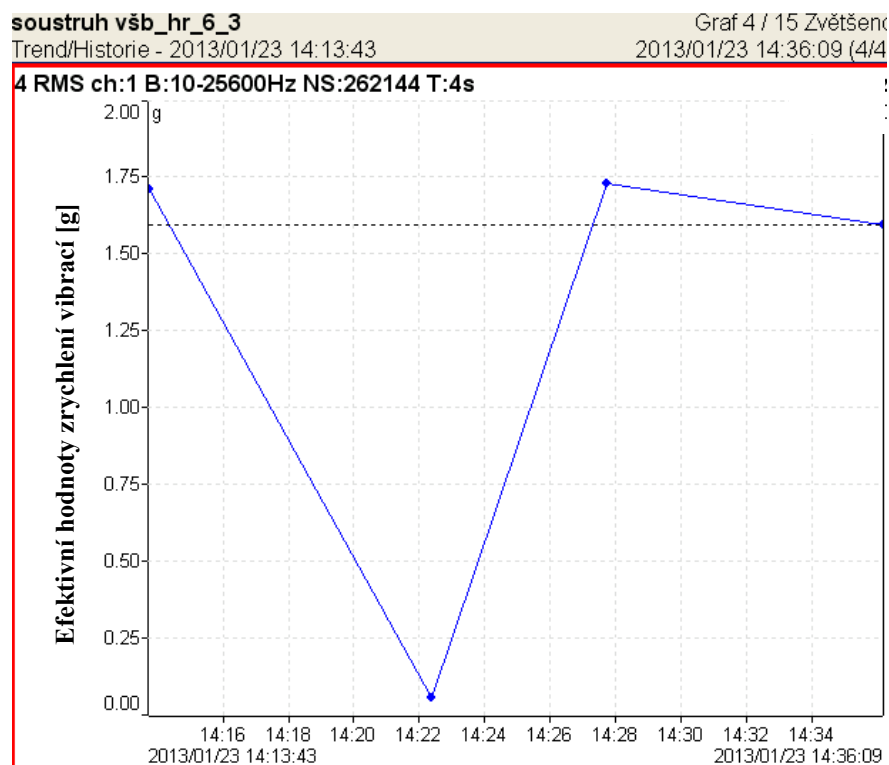


**Obr. 40:** Vývoj rychlosti vibrací (měření 6 - 9)

Další grafy jsou vytvořeny obdobně pro další měření (záběry). Na obrázku 41 a 42 jsou grafy závislosti pro měření 10 – 13 (znovu od čela). Doposud se vibrace nezvyšovaly a kvalita povrchu byla pořád velmi dobrá. S rostoucím opotřebením se však začíná drsnost mírně zhoršovat. Hodnoty vibrací zaznamenávají nárůst, který už může být zapříčiněn velkým ztenčením obrobku (velký průhyb).

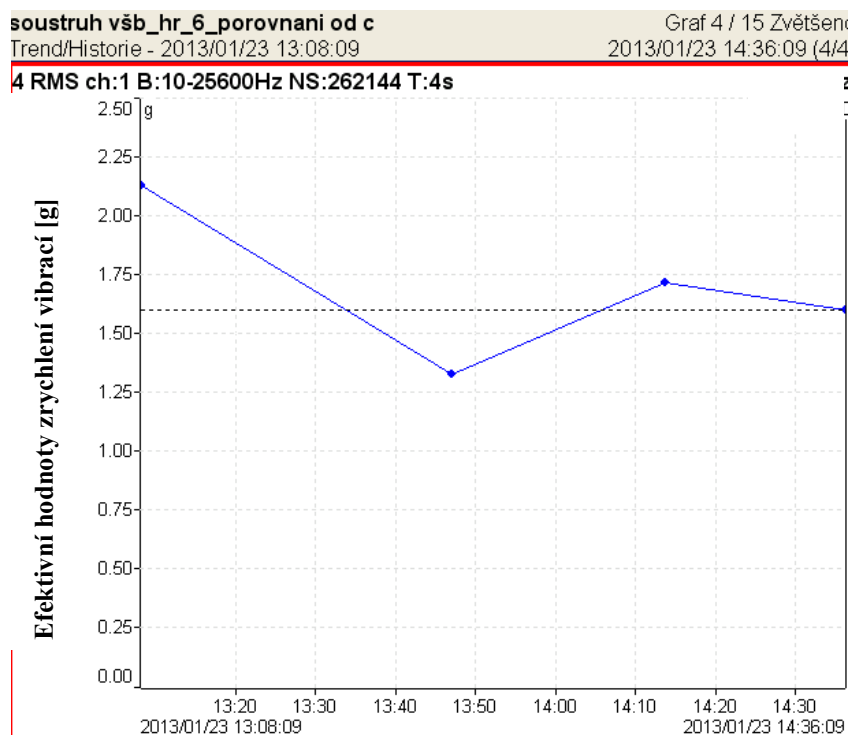


**Obr. 41:** Vývoj rychlosti vibrací (měření 10 - 13)



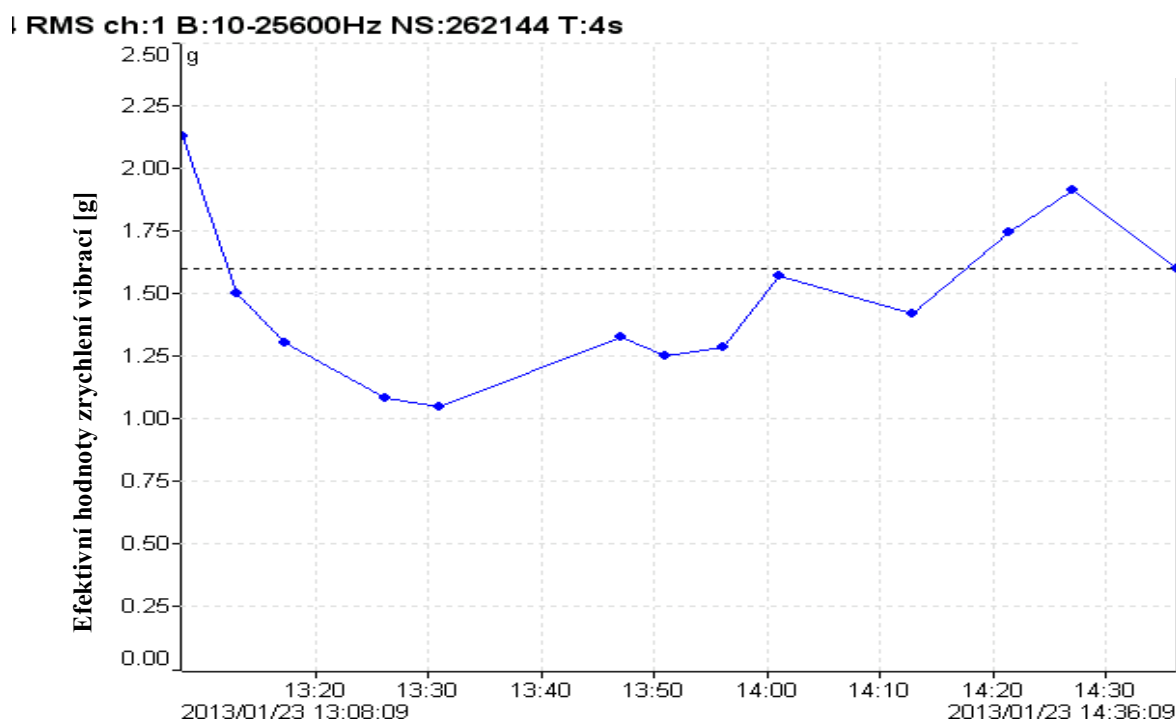
**Obr. 42:** Vývoj pro první kanál (zrychlení)

Další graf popisuje vývoj zrychlení vibrací, pouze těch záběrů, které začínaly od čela obrobku, tj. měření 1; 6; 10; 13.



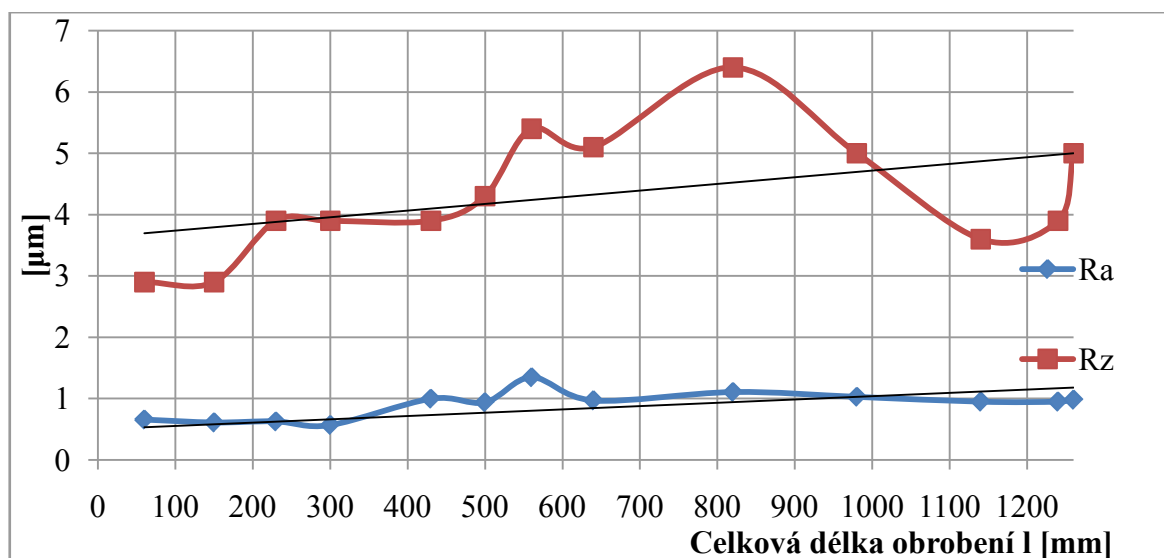
**Obr. 43:** Vývoj zrychlení pro záběry od čela obrobku

Komplexní pohled na vývoj zrychlení ve vertikálním směru pro šestou hranu destičky je zobrazen na obr. 44. Patrný je nejprve pokles hodnot po šestý bod, následuje vzestup a pokles (začátek od čela, průhyb uprostřed hřídele), celkově však vzrůst (opotřebení).

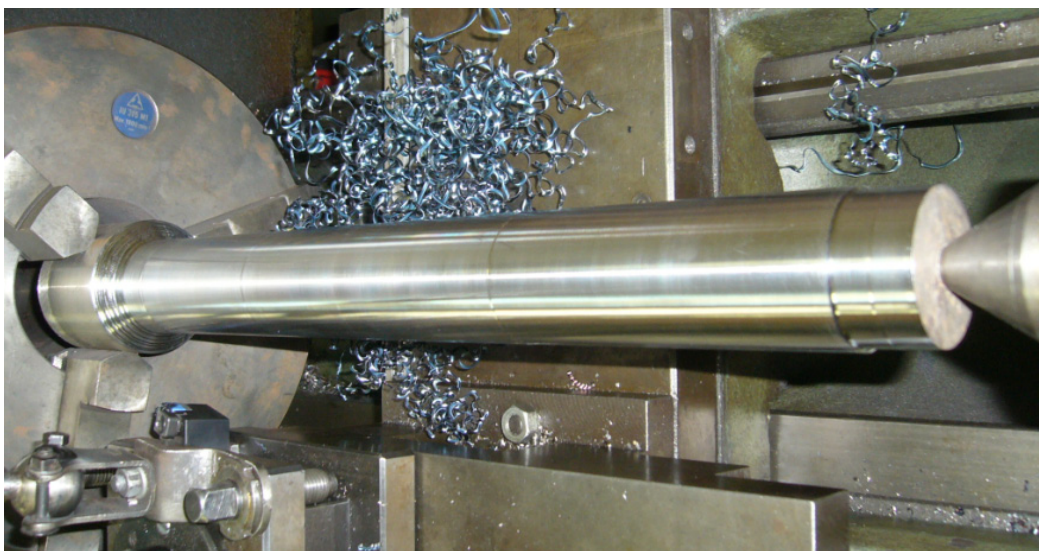


**Obr. 44:** Vývoj zrychlení vibrací – hrana 6

Následující graf zobrazuje vývoj dosažené drsnosti povrchu hranou 6, bez ohledu na aktuální polohu nástroje vůči obrobku (celková délka obrábění 1 260 mm). Trend ukazuje, že s rostoucí obrobenou délkou se bude zhoršovat drsnost povrchu. S větším opotřebením se tedy začíná nepatrně zhoršovat i kvalita povrchu (trend na obr. 45) a dochází ke zvýšení hodnot vibrací.



**Obr. 45:** Vývoj drsnosti povrchu na obrobené délce



**Obr. 46:** Součást po skončení experimentu (výborná jakost povrchu)

Na obrázku 46 je vyobrazena obráběná součást po skončení experimentu. Na obrázku je dobře vidět vysoká kvalita obrobeného povrchu dosažená poslední hranou destičky.

### 3. Závěr

Předmětem bakalářské práce bylo sledování vlivu vibrací na obráběcí proces.

Nejprve byl proveden teoretický rozbor vibrodiagnostiky, byl popsán měřicí přístroj a jeho komponenty. Byla popsána soustava stroj – nástroj – obrobek – přípravek. Následovalo zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení experimentu.

Experiment probíhal na univerzálním hrotovém soustruhu bulharské výroby. K soustruhu byla napojena potřebná měřicí technika pro snímání teploty v místě řezu, speciální držák vyměnitelné břitové destičky umožňující přenos elektrického signálu z destičky do stolního počítače. Další nezbytnou součástí byl dílenský mikroskop pro sledování a měření velikosti opotřebení. Polotovar pro obrábění byl zvolen v podobě tyče kruhového průřezu o jmenovitém průměru 74,5 mm a délce 550 mm, z oceli 17 618. Polotovar byl upnut do univerzálního tříčelistového sklíčidla a na druhém konci podepřen otočným hrotem upnutým v pinole koníku.

Samotný experiment proběhl ve dvou krocích. V prvním kroku byly snímače vibrací připojeny k větvení soustruhu a měření proběhlo pomocí modulu Rozběh. Takto získané hodnoty byly analyzovány v příslušném softwaru. V prvním kroku experimentu se měnila pouze řezná rychlost (v první fázi se zvyšovala, ve druhé se snižovala). V prvním kroku byla použita vyměnitelná břitová destička DIAS vyrobená z řezné keramiky. Tato destička byla zvolena záměrně, protože byla vyrobena z jiného řezného materiálu podobných vlastností, pro porovnání výsledků s jiným řezným materiálem. Při obrábění bylo dosaženo dobré drsnosti povrchu. Ve druhém kroku experimentu byla použita odlišná břitová destička značky Kyocera KS6000. Tento typ řezného materiálu byl zvolen záměrně, z důvodu vhodnosti jejího použití pro měření opotřebení a elektrického odporu. Snímače vibrací byly připojeny k nožovému držáku a záznam proběhl v modulu rekordér, což je časový záznam. Během experimentu se obráběl polotovar různými řeznými rychlostmi a posuvy, konstantní byla pouze hloubka záběru. Vzhledem k velkému rozsahu měření (pro každou hranu destičky probíhalo obrábění až do jejího úplného opotřebení) byl pro každou hranu vytvořen graf závislosti efektivní rychlosti vibrací na opotřebení hřbetu. Především u hrany č. 3, č. 4, č. 5 byly zaznamenány velmi vysoké hodnoty vibrací – tomu odpovídala i drsnost



povrchu; příčinou byla již vysoká řezná rychlost a velký posuv, svou roli zde také hrála tuhost celé soustavy.

Naměřené hodnoty vibrací byly příliš velké, ve frekvenčních spektrech se objevují velmi nevýrazné děje, které se velmi těžko analyzují. Pro experiment by musel být použit tuhý stroj, polotovar o větším průměru a menší délky (omezení průhybu hřídele, podpěrný hrot). Hodnoty vibrací vzniklých při experimentu nadměrně opotřebovávají stroj, mají negativní dopad na ložiska a převodovky stroje.

Použitá metoda sledování vibrací může mít uplatnění v praxi, ale s předpokladem, že bude aplikována na dostatečně tuhém stroji, pracujícím s vyššími otáčkami (např. 2 000 – 5 000 min<sup>-1</sup>), s použitím jiného typu snímačů o menší hmotnosti a větším rozsahem pracovní frekvence. Snímače by bylo potřeba umístit ještě blíže k měřenému místu, v případě soustruhu do držáku destičky. Následně by bylo možné přesněji analyzovat frekvenční pásma a zjistit, ve kterém pásmu se projeví samotné opotřebení nástroje.

## 4. Seznam použité literatury

- [1] HELEBRANT, František – ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*. VŠB – Technická Univerzita Ostrava.
- [2] DVOŘÁK, P. *Negativní vlivy vibrací vřetena: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2009, 55s.
- [3] NOVOTNÝ, Radovan. *Analýzy vad při zabezpečování spolehlivosti elektronických součástek* [on-line]. FEI VUT v Brně. 2001-06-29. [cit. 2013-05-08]. Dostupný z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01028/index.html>
- [4] BEJČEK, Ludvík. *Měření fyzikálních veličin*. Přednáškové texty kurzu BMFV. VUT – Brno. c2008
- [5] VOJÁČEK, A. *Principy akcelerometrů- 1. díl – Piezoelektrické* [on-line], [cit. 2013-05-11]. Dostupný z: <http://www.automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART303-principyakcelerometru--1-dil--piezoelektricke.html>
- [6] VOJÁČEK, A. *Principy akcelerometrů - 2. díl – Piezorezistivní* [on-line], [cit. 2013-05-11]. Dostupný z: <http://www.automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART306-principyakcelerometru--2-dil--piezorezistivni.html>
- [7] BLATA, J. *Vibrodiagnostika strojních zařízení: manuál pro výuku*. Ostrava, 2008. 24 s.
- [8] Adash spol. s r.o. *A4400 - VA4 Pro. ADASH* [on-line], [cit. 2013-05-8]. Dostupný z: [http://www.adash.cz/product\\_a4400\\_cz.php](http://www.adash.cz/product_a4400_cz.php)
- [9] Electronic catalog [online]. Vancouver: Kyocera industrial corp., 2011. Dostupné z: [http://americas.kyocera.com/kicc/pdf/ceramics\\_brochure.pdf](http://americas.kyocera.com/kicc/pdf/ceramics_brochure.pdf)
- [10] *Mechanické vlastnosti, pevnost v tahu vs. tvrdost* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.ruukki.cz/Produkty-a-reseni/Hutni-materialy/Layer-pages/Mechanicke-vlastnosti-pevnost-v-tahu-vs-tvrdost>

- [11] HUMÁR, A. *Technologie i technologie obrábění: 1. část*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie".
- [12] ABRAHAM, M. *Technologické aspekty opotřebení řezného nástroje*. Brno: VUT Brno strojní inženýrství, 2008 [cit. 2013-5-12]. Dostupné z [www: http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5250](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5250)
- [13] HUMÁR, A. *Technologie i technologie obrábění: 1. část*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie".
- [14] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L., *Technologie 2: 1. díl*. Ostrava: VŠB, 2007. 119s. ISBN 978-80-248-1641-8
- [15] AB SANDVIK COROMANT / SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M, Koudela. 1. vyd. Praha; Scienta, s.r.o. 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting - A Practical Handbok*. ISBN 9197 22 99-4-6.

## **5. Seznam příloh**

Příloha č. 1 - Akcelerometr AC102 Series

Příloha č. 2 - Akcelerometr AC104 Series.

Příloha č. 3 - Graf rozběhu 1

Příloha č. 4 - Graf rozběhu 2

Příloha č. 5 - Graf závislosti opotřebení hřbetu na strojním čase